

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

**Vliv řezných parametrů na integritu povrchu při  
vysokých rychlostech řezání**

*Influence of Cutting Parameters on Integrity Surface at High  
Speed Cutting*

Student:

Bc. Lukáš Pavlica

Vedoucí bakalářské práce :

Ing. et Ing. Mgr. Jana Nováková

Ostrava 2009

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne

.....

Bc. Lukáš Pavlica

## Poděkování

Děkuji Ing. et Ing. Mgr. Janě Novákové za vedení při vypracování diplomové práce a cenné připomínky a rady, které zvýšily úroveň celé práce.

### **Prohlašuji, že:**

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo;
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- было́ сје́днано, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- было́ сје́днано, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne

.....

Bc. Lukáš Pavlica

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

PAVLICA, L. *Vliv řezných parametrů na integritu povrchu při vysokých rychlostech řezání.* Katedra obrábění montáže, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009, 64 s.

Diplomová práce, vedoucí: Ing. et Ing. Mgr. Nováková J.

Tato diplomová práce se zabývá problematikou vlivu řezných parametrů na integritu povrchu při vysokých rychlostech řezání. Úvodem jsou popsány teoretické aspekty konvenčního a vysokorychlostního obrábění. Dále je zde vyjmenován vliv řezných podmínek na integritu povrchu obráběné součásti. Následuje popis experimentální ověření vlivu řezných parametrů postup a popis měření. Jsou vyhodnoceny měřené parametry a vyneseny výsledky do grafů. Závěrem jsou zhodnoceny výsledky měření a posouzení použitelnosti této metody v praxi.

## ANOTATION OF THESIS

PAVLICA, L. *Influence of Cutting Parameters on Integrity Surface at High Speed Cutting.* Department of Machining and Assembly, Faculty of Mechanical Engineering VŠB – Technical university of Ostrava, 2009, 64 p.

Thesis, Supervisor: Nováková J. multi MSc., M. A.

This thesis deals with problems influence cutting parameters on integrity surface at high speed cutting. In introduction the theoretical aspects draggy plus high - speed cutting are circumscribed. Further is here enumerated influence cutting conditions on integrity surface mechanined single parts. Follows the description of experimental check of influence cutting parameters progress and description of measuring., parameters are choosed and results staging results are brought up to the graphs. In fine are reviewed test data and appreciation usability those method practically.

## Obsah diplomové práce

|   |    |
|---|----|
| 1. Úvod .....   | 11 |
| 2. Teoretické aspekty konvenčního a rychlostního obrábění.....    | 12 |
| 2.1 Teoretické aspekty konvenčního obrábění .....                 | 12 |
| 2.1.1 Vznik třísky a její tvarování .....                         | 12 |
| 2.1.2 Plastická deformace při ortogonálním řezání .....           | 12 |
| 2.1.3 Tvorba třísky u konvenčního obrábění .....                  | 13 |
| 2.1.4 Integrita povrchu a charakteristické veličiny obrábění..... | 15 |
| 2.1.5 Oblasti deformací při tvoření třísky.....                   | 15 |
| 2.2 Teoretické aspekty vysokorychlostního obrábění .....          | 17 |
| 2.2.1 Pojem HSC .....   | 18 |
| 2.2.2 Definice HSC z pohledu tvorby třísky.....                   | 19 |
| 2.2.3 Tvorba třísky v režimu HSC.....                             | 20 |
| 2.2.4 Článkovitá tříska v režimu HSC .....                        | 20 |
| 2.2.5 Řezný proces při HSC .....                                  | 21 |
| 2.2.6 Přednosti HSC obrábění .....                                | 22 |
| 2.2.7 Tepelná bilance HSC technologií .....                       | 23 |
| 2.2.8 Porovnání konvenčního a HSC řezného procesu.....            | 24 |
| 3. Vliv řezných podmínek na integritu povrchu součásti .....      | 26 |
| 3.1 Vliv řezné rychlosti.....                                     | 26 |
| 3.1.1 Vliv řezné rychlosti na řezné síly .....                    | 26 |
| 3.1.2 Vliv řezné rychlosti na trvanlivost bříty nástroje .....    | 26 |
| 3.2 Velikost posuvu, hloubka řezu .....                           | 27 |
| 3.3 Vliv řezných podmínek na kvalitu obrobeného povrchu.....      | 28 |
| 4. Experimentální ověření vlivu řezných parametrů.....            | 30 |
| 4.1 Použitý stroj .....   | 31 |
| 4.2 Použité nástroje.....   | 33 |
| 4.3 Zkušební materiály .....                                      | 35 |
| 4.4 Stanovení drsnosti povrchu .....                              | 37 |
| 4.4.1 Parametry drsnosti povrchu (výškové parametry).....         | 37 |
| 4.4.2 Použité zařízení pro měření drsnosti vzorků .....           | 39 |
| 4.4.3 Tabulky a grafy naměřených hodnot drsností povrchu .....    | 44 |

|   |    |
|---|----|
| 4.5 Stanovení tvrdosti povrchu .....                                  | 51 |
| 4.5.1 Tabulky a graf naměřených hodnot .....                          | 53 |
| 4.6 Stanovení zbytkových pnutí .....                                  | 54 |
| 4.6.1 Charakteristika posuzovaného materiálu 12050.1 .....            | 54 |
| 4.6.2 Charakteristika magnetoelastické metody .....                   | 54 |
| 4.6.3 Princip Barkhausenova šumu .....                                | 55 |
| 4.6.4 Tabulky a grafy naměřených hodnot .....                         | 56 |
| 5. Vyhodnocení a shrnutí přínosů pro praxi .....                      | 59 |
| 5.1 Vyhodnocení dosažených výsledků u drsnosti povrchu .....          | 59 |
| 5.2 Vyhodnocení dosažených výsledků u tvrdosti povrchu .....          | 59 |
| 5.3 Vyhodnocení dosažených výsledků zbytkových pnutí v materiálu..... | 60 |
| 6. Závěr .....  | 61 |
| 7. Použitá literatura.....  | 62 |

## Seznam použitého značení

|               |   |                         |
|---------------|---|-------------------------|
| $a_p$         | - hloubka řezu .....                                | [mm]                    |
| $v_f$         | - rychlost posuvu.....                              | [mm.min <sup>-1</sup> ] |
| $n$           | - otáčky .....                                      | [min <sup>-1</sup> ]    |
| $v_c$         | - řezná rychlost .....                              | [m.min <sup>-1</sup> ]  |
| $t$           | - čas .....   | [min]                   |
| $u_A$         | - standardní nejistota typu A.....                  | [mm]                    |
| $u_B$         | - standardní nejistota typu B .....                 | [mm]                    |
| $u_C$         | - kombinovaná standardní nejistota .....            | [mm]                    |
| $u_{B1}$      | - nejistota vlivu opěrné paty snímacího hrotu.....  | [mm]                    |
| $u_{B2}$      | - nejistota měřicího přístroje.....                 | [mm]                    |
| $S_{(x)}$     | - směrodatná odchylka .....                         | [mm]                    |
| $\sigma_{Pt}$ | - pevnost v tahu .....                              | [MPa]                   |
| $z$           | - počet zubů frézy .....                            | [ - ]                   |
| $v_d$         | - deformační rychlost .....                         | [m.min <sup>-1</sup> ]  |
| $a, a_1$      | - tloušťka třísky.....                              | [mm]                    |
| $l, l_1$      | - délka třísky .....                                | [mm]                    |
| $h_c$         | - nedeformovaná tloušťka třísky.....                | [mm]                    |
| $\lambda_s$   | - úhel sklonu ostří .....                           | [°]                     |
| $\gamma_{re}$ | - pracovní úhel čela.....                           | [°]                     |
| $\delta_0$    | - úhel řezu .....                                   | [°]                     |
| $\Phi_1$      | - úhel střížné roviny .....                         | [°]                     |
| $\beta_{kon}$ | - úhel smykové roviny při konvenčním obrábění ..... | [°]                     |
| $\beta_{HCS}$ | - úhel smykové roviny při HSC .....                 | [°]                     |
| $\Psi$        | - úhel kluzu .....                                  | [°]                     |
| $\Phi$        | - úhel stříhu .....                                 | [°]                     |
| $K_{re}$      | - pracovní úhel nastavení .....                     | [°]                     |
| $\Phi_N$      | - úhel kluzných rovin .....                         | [°]                     |
| $\Phi_M$      | - úhel kluzných rovin .....                         | [°]                     |
| $U_C$         | - rozšířená kombinovaná nejistota .....             | [mm]                    |
| $F$           | - řezná síla.....                                   | [N]                     |
| $F_n$         | - řezná síla na čele nástroje.....                  | [N]                     |
| $F_t$         | - třecí složka řezné síly .....                     | [N]                     |



|                    |  |                    |
|--------------------|--|--------------------|
| S, S <sub>1</sub>  | - průřez třísky.....   | [mm <sup>2</sup> ] |
| Ap <sub>1</sub>    | - maximální využitelná délka řezné části nástroje.....         | [mm]               |
| D <sub>1</sub>     | - řezný průměr nástroje.....                                   | [mm]               |
| D                  | - průměr stopky nástroje .....                                 | [mm]               |
| K                  | - součinitel přechování třísky.....                            | [ - ]              |
| L                  | - celková délka nástroje .....                                 | [mm]               |
| LS                 | - použitelná délka stopky nástroje .....                       | [mm]               |
| Z <sub>p</sub>     | - nejvyšší výstupek profilu.....                               | [μm]               |
| Z <sub>v</sub>     | - nejnižší prohlubeň profilu .....                             | [μm]               |
| R <sub>a</sub>     | - průměrná aritmetická úchylka profilu .....                   | [μm]               |
| R <sub>z</sub>     | - největší výška profilu .....                                 | [μm]               |
| R <sub>t</sub>     | - celková výška profilu .....                                  | [μm]               |
| R <sub>p</sub>     | - největší výška profilu od střední čáry profile.....          | [μm]               |
| HB                 | - tvrdost dle Brinella .....                                   | [HB]               |
| MBN                | - průměrné hodnoty Barkhausenova šumu .....                    | [μV]               |
| MBN <sub>max</sub> | - maximální amplituda Barkhausenova šumu .....                 | [μV]               |
| HB                 | - tvrdost dle Brinella .....                                   | [HB]               |
| Q <sub>N</sub>     | - teplo odvedené nástrojem.....                                | [J]                |
| TiC                | - titan karbid.....  | [ - ]              |
| TiCN               | - titan karbon nitrid .....                                    | [ - ]              |
| TiN                | - titan nitrid .....   | [ - ]              |
| PVD                | - vícevrstvý povlak .....                                      | [ - ]              |
| HSC                | - High Speed Cutting (vysokorychlostní obrábění)               | [ - ]              |
| CAD                | - Computer Aided Design (Počítačová podpora konstruování)..... | [ - ]              |
| CAM                | - Computer Aided Manufacturing ( řízení výroby počítačem)..... | [ - ]              |
| CIM                | - Computer Integrated Manufacturing (počítačem integr. výroba) | [ - ]              |
| CNC                | - Computer Numerical Control (počítačem řízený stroj).....     | [ - ]              |
| KBN                | - kubický nitrid boru .....                                    | [ - ]              |
| I                  | - oblast primární plastické deformace.....                     | [ - ]              |
| II                 | - oblast sekundární plastické deformace.....                   | [ - ]              |
| III                | - oblast terciární plastické deformace .....                   | [ - ]              |
| OMNO               | - oblast ohraničující primární plastickou deformaci .....      | [ - ]              |

## 1.Úvod

V diplomové práci se popisuje problematika vysokorychlostního obrábění. V teoretické části se uvádí aspekty a vlivy rychlostního obrábění, srovnává toto rychlostní obrábění s konvenčním a je zkoumán vliv řezných podmínek na integritu povrchu. V experimentální části je zkoumán vliv tohoto obrábění na drsnost povrchu, tvrdost povrchu a zbytková pnutí, která zůstávají v materiálu po rychlostním obrábění.

Koncepci obrábění vysokými řeznými rychlostmi začal jako první uplatňovat Dr. Carl J. Salomon, který v letech 1924 – 1931 provedl sérii experimentů, které v roce 1931 vyústily v německý patent. Experimenty prováděl na neželezných kovech jako jsou hliník, měď či bronz. Na svou dobu dosáhl Salomon překvapivě vysokých řezných rychlostí (až 16500 m/min). Jeho vize spočívala v tom, že teplota dosahuje maxima při určité řezné rychlosti a při jejím dalším zvyšování teplota řezání rychle klesá. Pokles teploty zdůvodňoval tím, že primární plastická deformace se s řeznou rychlostí zmenšuje, protože stupeň plasticity materiálu je závislý na rychlosti deformace, proto s rostoucí řeznou silou se stává materiál méně plastickým. Jeho záměrem bylo osáhnout tzv. kritické řezné rychlosti, které odpovídá kritická řezná teplota. Za touto hranicí mělo dle Salomona dojít ke snížení teploty řezání až na takovou hodnotu, jaká by byla při běžné řezné rychlosti.

V současné době světový vývoj obráběcích strojů, řezných nástrojů a technologiemi vysokorychlostního obrábění a otevírajícími se možnostmi nových nástrojů. Je to postupný přechod od silového obrábění, které je založeno na robustních nástrojích a tuhých strojích, k rychlostnímu obrábění, které dosahuje vyšších řezných výkonů třískami menšího průřezu při vysokých rychlostech řezání, menších průměrech rotujících řezných nástrojů, vyšších otáček vřeten a vyšších rychlostech pracovních posuvů. U vysokorychlostního, suchého, polosuchého a tvrdého obrábění přistupují navíc i pozitivní efekty měknutí třísky při teplotách blízkých tavné teplotě obráběného materiálu, zkrácení kontaktní zóny styku třísky s nástrojem, zrychlení pohybu třísky po čele nástroje a snížení přenosu tepla z třísky do nástroje. Konečným efektem je pak snížení řezných sil, prodloužení životnosti nástrojů, snížení deformací rámu stroje, zvýšení přesnosti obrábění i kvality obráběných povrchů a v neposlední řadě i snížení závislosti řezné síly na hloubce řezu, která se projeví zvýšenou odolností stroje proti samobuzeným kmitům.

## 2. Teoretické aspekty konvenčního a rychlostního obrábění

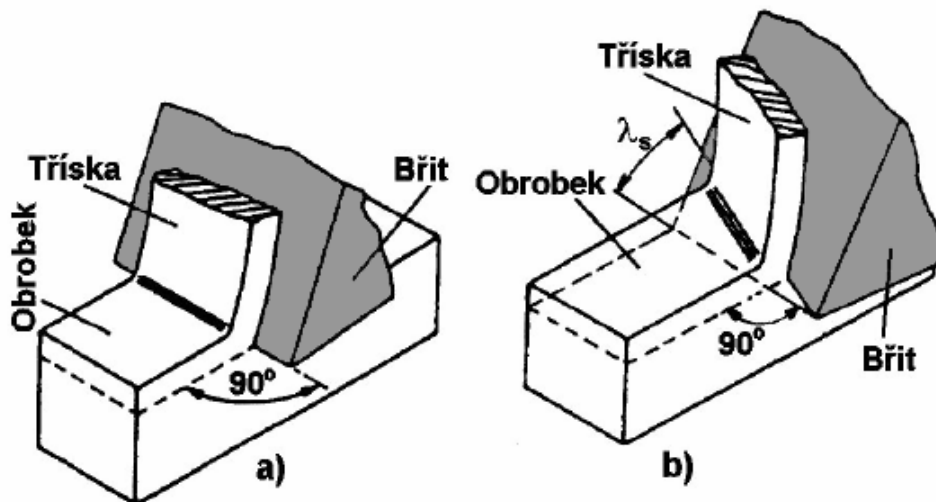
### 2.1 Teoretické aspekty konvenčního obrábění

Při obrábění působí obráběcí nástroj na obrobek a vyvolává v materiálu napětí, proti kterému klade materiál odpor. Proto má obrobek na povrchu materiálu výrazné charakteristiky stavu napjatosti, teploty a deformace a dochází ke vzniku třísky. Proces řezání může být vykonáván jako ortogonální nebo obecné řezání. [1]

#### 2.1.1 Vznik třísky a její tvarování

V případě **ortogonálního řezání** je ostří nastaveno kolmo na směr řezného pohybu. Typickým příkladem ortogonálního řezání je zapichování, frézování frézou s přímými zuby, protahování aj. Schématicky je ortogonální řezání znázorněno na obr. 1 a).

Při **obecném řezání** musíme řešit řezný proces v prostoru (podélné soustružení, vrtání, frézování nástrojem se zuby ve šroubovici apod. Schéma je uvedeno na obr.1 b). [1]

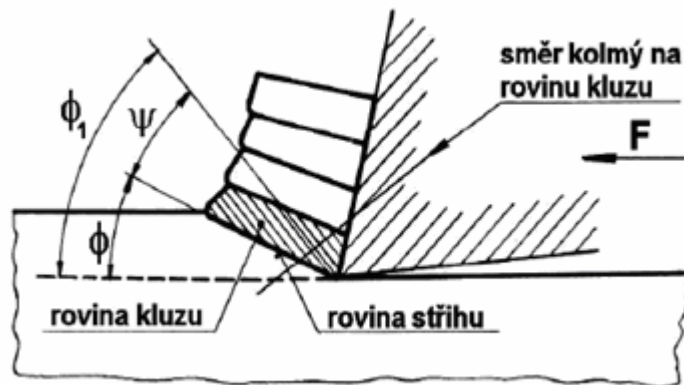


Obr. 1 Realizace řezného procesu, a) ortogonální řezání, b) obecné řezání [5]

#### 2.1.2 Plastická deformace při ortogonálním řezání

Když vniká řezný klín nástroje do povrchu obrobku, dochází v oblasti tvoření třísky k pružným a následně k plastickým deformacím. Břit nástroje je tlačěn do obrobku silou  $F$ . Pružné deformace jsou rozloženy do celého obrobku, plastické deformace zahrnují jen zónu řezání. O rozložení napětí v zóně řezání je možné usuzovat z dostupných fotoelasticimetrických, případně jiných metod.

Smyková napětí rostou až na takovou hranici, než dojde k plastické deformaci materiálu obrobku před břitem nástroje (posuv vrstev v kluzných rovinách pod úhlem  $\phi_1$ ). Pohyb nástroje pokračuje, roste plastická deformace a dochází k přechování a posunu vrstev materiálu ve směru kolmém ke kluzným rovinám. Oddělováním třísky se v podstatě ukončuje proces plastické deformace. Plastický lom nastává působením kluzné síly, zatímco křehký lom působením síly normálové. [1]



Obr. 2 Vznik třísky při konvenčním způsobu obrábění [5]

Při dalším pohybu nástroje roste napětí v materiálu, až dosáhne vyšší hodnoty, než je mez stříhu obráběného materiálu a dojde k oddělení segmentu třísky pod úhlem stříhu  $\Phi$ . Rozdíl mezi úhly  $\phi_1$  a  $\phi$  se pohybuje v rozmezí  $\psi = (0 \div 30)^\circ$ , nízké hodnoty úhlu  $\psi$  vykazují tvárné materiály (např. ocel), vysoké hodnoty naopak materiály křehké (např. šedé litiny). [1]

### 2.1.3 Tvorba třísky u konvenčního obrábění

Základní podmínkou pro obrábění je naprostá převaha požadovaných fyzikálních vlastností materiálu řezného nástroje nad obráběným. Obecně se předpokládá, že se vzrůstající řeznou rychlostí roste celkové množství tepla, a to téměř úměrně s narůstající rychlostí stříhu třísky i intenzitou tření třísky o nástroj. **Plastickou deformací třísky v rovině stříhu se „skokově“ mění její teplota, která dále roste třením třísky o čelo nástroje.**

Při **konvenčním obrábění** dochází ve smykové rovině **k mechanickému zpevnění** třísky, které vede k jejímu ztvrdnutí oproti původnímu stavu. Díky tomu, že zpevněná tříska klade větší odpor, narůstá úhel roviny stříhu, který zvyšuje tloušťku třísky i její odpor proti

ohybu a současně zvětšuje plochu kontaktní zóny. [1]

Mezi třískou a čelem nástroje působí přitlačné i třecí síly, které mají vysoké hodnoty. Dochází takto k přechodu velké části tepla vyvolaného třením z třísky do nástroje. Třecí teplo a velká přitlačná síla třísky podporují difusní procesy, které vedou k vymílání kráteru na čele nástroje. Intenzita vývoje celkového tepla roste úměrně se zvyšováním rychlosti **smyku třísky** ve smykové rovině, ale také s řezným odporem, který je dán obráběným materiálem.

Za těchto podmínek se nedají (anebo jen velmi problematicky) obrábět tvrdé a kalené materiály. Z uvedených faktů vyplývá, že „**horní mez**“ řezné rychlosti je u „klasických“ materiálů a „konvenčních“ nástrojů omezen prudkým poklesem řezivosti způsobeném náhlou plastickou deformací, kterou způsobuje intenzivně rostoucí teplo vzniklé při obrábění.

Během řezného procesu lze provádět pozorování **mikrozměn** i **makrozměn**. Přímé pozorování změn v mikroskopických objemech, které odpovídají řádově velikosti zrna je značně obtížné vzhledem k vysoké deformační rychlosti  $v_d$ , (řádově se pohybující  **$10^4$  až  $10^6 \text{ m.s}^{-1}$** ), intenzivní a nerovnoměrné deformaci a vysokému teplotnímu gradientu při ohřevu deformovaného materiálu (řádově  **$10^4$  až  $10^6 \text{ }^\circ\text{C.s}^{-1}$** ), ovlivňujícímu zejména v oblasti sekundární deformace jak deformační zpevnění, tak i fázové přeměny.

Uvedené charakteristiky výrazně omezují přímé pozorování mikrozměn v oblasti kořene třísky na úzký rozsah řezných podmínek, týkajících se pouze nižších řezných rychlostí. Mezi experimentální metody přímého zjišťování mikrozměn patří fotografování boční plochy vzorku při ortogonálním řezání a rychlostním filmování. Kamery pro rychlostní filmování se nazývají časové lupy. Podstatou je zde fotografování zkoumaného děje vysokou snímkovou frekvencí ( **$4000$  až  $18000 \text{ obr.s}^{-1}$** ) a následné promítnutí s frekvencí podstatně nižší. Nevýhodou je však složité, pracné a nákladné provedení experimentu.

Přímé pozorování změn v makroskopických objemech je méně obtížné než přímé pozorování mikrozměn. **Makroskopické změny** lze pozorovat *fotografováním* boční plochy vzorku při ortogonálním řezání, rychlostním *filmováním* nebo přímým pozorováním *pod mikroskopem*, avšak za extrémně nízkých řezných podmínek. Boční plocha zkoumaného vzorku je opatřena pomocnou mřížkou, prostřednictvím níž lze určovat deformace jednotlivých elementů, což umožní vymezení deformačních oblastí a stanovení charakteru a intenzity deformace ve směru zvolených souřadných os. Při použití časové

lupy má tento způsob experimentálního studia velký význam pro sledování vzniku elementární třísky a pro sledování tvorby i rozpadu nárůstku. [1]

Experimentálním studiem změn ukončených lze stanovit součinitel přechování třísky

$$K = \frac{a_1}{a} = \frac{l}{l_1} = \frac{S_1}{S} > 1 \quad [1]$$

#### 2.1.4 Integrita povrchu a charakteristické veličiny obrábění

Kvalita obrobku závisí především na tvarové a rozměrové přesnosti, metalurgických vlastnostech určených materiálem a jeho zpracováním a na vlastnostech povrchu. Funkční vlastnosti povrchu popisuje určitý soubor charakteristik, který označujeme integritou povrchu. K těmto charakteristikám patří především: [7]

- 1) Topografie povrchu (geometrické charakteristiky povrchu).
- 2) Strukturní a fyzikálně-chemické změny v povrchové vrstvě (zbytková pnutí).
- 3) Stupeň, hloubka a charakter zpevnění.
- 4) Smysl, velikost a průběh reziduálních pnutí.

K charakteristickým veličinám probíhajícího procesu třískového obrábění řadíme rychlost hlavního řezného pohybu, velikost rychlostí vedlejších pohybů, hloubku odebírané vrstvy, velikost síly obrábění a jejich složek, opotřebení nástroje, dynamickou tuhost soustavy, opotřebení nástroje, průběh teplotního pole nástroje a obrobku a jejich okamžité teploty na površích a prostředí (tlak, teplota, množství a složení případné procesní kapaliny) obklopující řezný proces obrábění. [1]

#### 2.1.5 Oblasti deformací při tvoření třísky

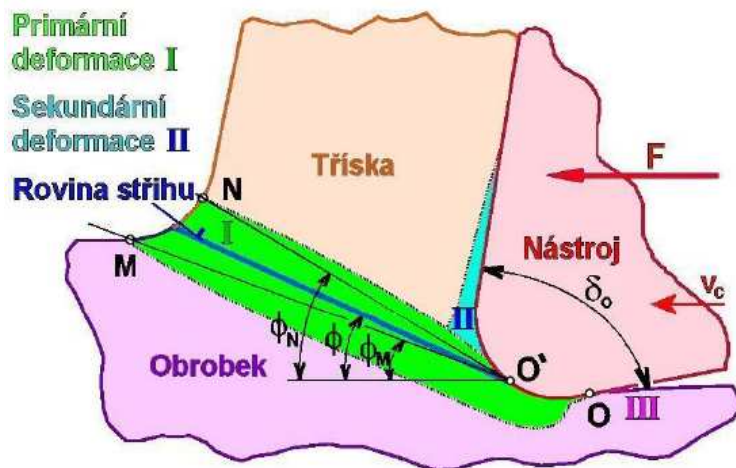
Při vnikání břitu nástroje do obráběného materiálu vznikají pružné a následně plastické deformace v těchto oblastech:

- před břitem nástroje, v oblasti primární plastické deformace, která se značí **I** a vymezuje body **OMNO**’;
- v povrchových vrstvách styku třísky a čela nástroje je oblast sekundární plastické deformace, která je označena **II**;
- v povrchové vrstvě obrobené plochy vzniká oblast terciární plastické deformace

Velikost oblasti  $OMNO'$ , její tvar a stav napjatosti jsou proměnlivé a závisí zejména na fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu, především na jeho deformační a zpevňovací schopnosti.

S rostoucí rychlostí řezání  $v_c$ , ale zejména rychlostí posuvu  $v_f$  se tato oblast značně zužuje (ve vysokorychlostním resp. „HSC“ obrábění) a tím obě roviny téměř splývají. Rovněž záleží na řezném prostředí (chlazení, suché obrábění), geometrii řezného nástroje a jemu předurčené kinematice (myšleno vzhledem k obrobku).

Při zvětšování pracovního úhlu čela  $\gamma_{ne}$  klade nástroj menší odpor proti odchodu třísky, tříska tak odchází snadněji, a proto je méně deformována. Při zvětšování pracovního úhlu nastavení  $\kappa_{re}$  se šířka třísky zmenšuje, což se projeví v poklesu velikosti koeficientu přechování třísky, ale pouze do určité hodnoty tohoto úhlu. Při volbě optimálních řezných podmínek je nutno mít tyto zákonitosti na zřeteli. [1]



Obr. 3 Oblasti plastických deformací v zóně řezání [5]

Plastická deformace obráběného materiálu v procesu řezání způsobuje [1]:

- oddělení třísky od obrobku (oblast I);
- mechanické zatížení nástroje řeznými odpory;
- tepelné zatížení nástroje;
- opotřebení nástroje (na čele v důsledku II, na hřbetu v důsledku vlivu III);
- změnu textury materiálu v tříске i v povrchové vrstvě obrobené plochy;
- vznik zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobené plochy;
- přechování třísky (průřez a délka třísky neodpovídají teoretickým hodnotám).

## ***2.2 Teoretické aspekty vysokorychlostního obrábění***

Rozdíly mezi rychlostním a konvenčním obráběním se výrazně projevují v mechanismu tvorby třísky. Oddělování třísky je velmi složitým procesem, jehož průběh závisí na mnoha činitelích, zejména na fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu a jejich závislosti na podmínkách plastické deformace. Obecně platí, že při zvyšující se řezné rychlosti se oblast plastické deformace v zóně tvorby třísky zužuje a ke vzniku třísky dochází plastickým skluzem v jediné rovině, tzv. rovině stříhu.

Velikost úhlu roviny stříhu lze získat z podmínky minimálně vynaložené práce.

Cílem řešení je nalezení úhlu  $\Phi$ , pro který bude síla  $F$ , kterou nástroj působí na odřezávanou vrstvu, minimální. Úhel střížné roviny závisí především na úhlu řezu a úhlu tření :

Protože úhel, který vyjadřuje tzv. střední součinitel tření, který obsahuje jednak vnitřní tření v materiálu třísky, jednak vnější tření mezi třískou a čelem nástroje, bude úhel ovlivněn všemi řeznými podmínkami, které mají vliv na velikost tohoto úhlu. Hned po fyzikálních vlastnostech obráběného materiálu má největší vliv řezná rychlost  $v_c$ , a to na deformační rychlost a množství vyvinutého tepla a tím i na teplotu povrchových vrstev třísky. Dále je tento úhel ovlivněn mazacím médiem, který snižuje součinitel smykového tření na čele nástroje. [16]

V podmínkách HSC obrábění znamená rostoucí řezná rychlost i vyšší množství práce potřebné k řezání, která se přemění v teplo. Převážná část vzniklého tepla se odvádí třískou, její teplota se blíží tavicí teplotě obráběného materiálu. Při určité řezné rychlosti se náhle



změní fyzikální a chemické vlastnosti třísky a transformace obráběného materiálu v třísku probíhá v rovině stříhu za vysoké teploty, která způsobí její podstatné změknutí a střední součinitel tření  $f = \tan \varphi$  se výrazně zmenší. Tím je značně eliminován vliv normálové složky řezné síly  $F_N$  na čele nástroje, poklesne celkový řezný odpor, a tedy i třecí složka řezné síly  $F_t$ , důsledkem toho se zmenší intenzita opotřebení čela nástroje a úhel střižné roviny  $\varphi$  se zvětší při značně zmenšeném úhlu tření  $\varphi$  podle předchozí rovnice na hodnotu:

Je-li téměř veškeré vzniklé teplo při obrábění odvedeno třískou, je minimalizován vliv energetického působení na vlastnosti povrchové vrstvy a vznik nežádoucích reziduálních pnutí po obrábění. Tato pnutí, často spojená s fázovými přeměnami, jsou vyvolána plastickou deformací povrchové vrstvy za působení teploty řezání. [16]

### 2.2.1 Pojem HSC

Řezné procesy, nástroje a stroje pro vysokorychlostní obrábění jsou hlavním současným trendem vývoje obráběcích strojů a technologií, skutečnou revolucí v třískovém obrábění. HSC technologie zahrnují kromě vlastního vysokorychlostního obrábění i tzv. **suché a tvrdé obrábění**. Jsou zaměřeny k dosažení řádově vyšší kvality a intenzity řezného procesu.

Vysokorychlostní obrábění sleduje zvýšení úběru třísek, kvality obráběného povrchu, životnost nástroje podstatným zvýšením řezné rychlosti při sníženém průřezu třísky a také při snížené řezné síle. Vysoká relativní rychlost třísky vzhledem k čelní ploše nástroje spolu s novou kvalitou řezné hrany zvyšuje podíl tepla řezného procesu, které odchází s třískou, snižuje tepelné i mechanické namáhání nástroje a prodlužuje jeho životnost. Redukce tepelných toků do nástroje, rámu stroje a do obrobku za současného snížení řezných sil přináší zvýšení přesnosti obrobku a kvality jeho povrchu. [2]

**Suché obrábění** sleduje vyloučení nebo minimalizaci užití řezných kapalin a redukci nákladů na jejich filtraci a recyklování. Kromě obvykle nesnadného „nulového řešení“ je častěji užito kvazisuchého obrábění, které ponechává určité silné zredukované množství řezné kapaliny pro mazání kontaktní plochy třísky a snížení třecích sil mezi třískou a nástrojem. Chladicí a třísku odplavující efekty se tímto ztrácejí a snižuje se tak spotřeba procesní kapaliny. [3]

**Tvrdé obrábění** znamená obrábění kalených ocelí a jiných tvrdých materiálů nástroji s definovaným tvarem řezné hrany náhradou za dříve užívanou technologii broušení. Tvrdé obrábění je umožněno použitím kubického nitridu boru (KBN) jako řezného materiálu, který je druhým materiálem co do tvrdosti za diamantem, ale svou tvrdost si na rozdíl od diamantu udržuje až do vysokých teplot (až do 2000 °C), překračujících tavnou teplotu železitých materiálů. Má také mnohem vyšší odolnost proti mechanickým a teplotním šokům. Tyto technologie mají společný základ, který vyplývá z příbuznosti jevů řezného procesu při zvyšování řezné rychlosti a teploty třísky. [3]

### 2.2.2 Definice HSC z pohledu tvorby třísky

Pojem HSC je velmi relativní. Je například mnohem snazší obrábět hliníkovou slitinu při řezné rychlosti 1800 m.min<sup>-1</sup> než slitinu titanu při řezné rychlosti 180 m.min<sup>-1</sup>. Nelze totiž říci, že konvenční obrábění přechází do oblasti vysokorychlostního obrábění od určité hodnoty řezné rychlosti, aniž bychom brali ohled na ostatní podmínky vytvářející proces. Těmito podmínkami je myšlen jednak způsob obrábění a především druh obráběného materiálu, který je zejména tím rozhodujícím faktorem určujícím příslušnou velikost řezné rychlosti. Řezné rychlosti, při nichž lze dané materiály obrábět tak, aby bylo dosaženo přijatelné trvanlivosti břitu, jsou velmi rozdílné.

Někteří odborníci se přiklánějí k definici, že o HSC jde tehdy, když střední teplota řezání dosahuje hodnot blízkých teplotě tavení obráběného materiálu. V praxi se ujal názor, že obrábění vysokými rychlostmi řezání probíhá v oblasti od 600 do 1800 m.min<sup>-1</sup>, obrábění superřeznými rychlostmi od 1800 do 18 000 m.min<sup>-1</sup> a obrábění ultrařeznými rychlostmi nad 18 000 m.min<sup>-1</sup>. V případě těžkoobrobitelných materiálů, jako jsou slitiny niklu či titanu, se dává spíše přednost výrazu výkonové obrábění. A z hlediska procesu tvoření třísky by třetí definice mohla znít asi tak, že vysoká rychlost řezání je taková rychlost, od které se v celé oblasti primární plastické deformace vytvářejí pouze lokalizované smyky bez intenzivní plastické deformace. [4]

### 2.2.3 Tvorba třísky v režimu HSC

Z hlediska tvorby třísky je znám vznik především dvou druhů třísek, a to třísky soudržné a elementární. Podle rozložení plastické deformace je soudržná tříska plynulá nebo článkovitá. Plynulá tříska se vytváří u kovů a slitin s krychlovou, prostorově nebo plošně středěnou krystalovou mřížkou s vysokou tepelnou vodivostí a malou tvrdostí (jsou to např. slitiny hliníku nebo oceli s nízkým obsahem uhlíku). Naopak tvorba článkovité souvislé třísky je pozorována u obrábění kovů s hexagonální těsnou krystalovou mřížkou, které se vyznačují nízkou tepelnou vodivostí a vysokou tvrdostí. Do této skupiny patří převážně materiály, jakými jsou titanové a niklové slitiny.

Druh vzniklé třísky pro určitý obráběný materiál závisí také na velikosti řezné rychlosti. Proto je u vysokorychlostního obrábění pozorován vznik soudržné plynulé třísky, soudržné článkovité třísky i třísky elementární. Při nízkých řezných rychlostech se může pro jeden obráběný materiál vytvářet plynulá soudržná tříska a od určité řezné rychlosti se začne vytvářet soudržná článkovitá tříska. S dalším nárůstem řezné rychlosti se změní soudržná článkovitá tříska na třísku elementární [4].

### 2.2.4 Článkovitá tříska v režimu HSC

Mechanismus vzniku článkovité třísky při HSC lze u ocelí popsat čtyřmi stadii. Popis tvorby článku je proveden při ortogonálním volném řezání s negativním úhlem čela [4].

#### *1. stádium vzniku článku třísky*

Maximální tlakové napětí se vyskytuje v oblasti zaoblení ostří a směrem k povrchu obrobku se podél roviny smyku zmenšuje. Nízká hodnota tlakového napětí na povrchu a kritická hodnota smykového napětí iniciují vznik trhliny. Trhlina vznikne na povrchu v bodě  $B'$  a šíří se směrem k ostří, kde je zastavena plastickým stavem (trhlina ohraničena body  $A'$  a  $B$ ). Vznik trhliny je počátkem tvorby nového článku třísky. Délka trhliny je porovnatelná s nedeformovanou tloušťkou třísky  $h_c$ . Existenci vzniku trhliny dokazuje. [4]

### *2. stádium vzniku článku třísky*

Následkem výskytu trhliny je budoucí článek třísky umístěn mezi trhlinu a čelo bříty. Poté dochází vlivem pohybu bříty ke zkracování úsečky  $AA'$  a dochází k deformaci části článku třísky. Rychlost pohybu třísky po čele a zužování článku třísky vytváří velké množství tepla a teplota třísky dosahuje hodnoty kolem  $A_{c3}$ . Za určitých podmínek může vznikat vlivem této teploty martenzit. Bílé pásy zobrazené představují plasticky deformovanou oblast třísky.

### *3. stádium vzniku článku třísky*

V tomto stádiu je vzdálenost  $AA'$  tak malá, že dochází k velké deformaci zbylé části článku třísky. Tloušťka třísky je v tomto stadiu malá a ochlazování zde probíhá extrémně rychle. Transformace v této části probíhá adiabaticky.

### *4. stádium vzniku článku třísky*

Tříska je v tomto stádiu vytvořena a začíná vzrůstat tlakové napětí. Cyklus její tvorby se začíná opakovat. [4]

## **2.2.5 Řezný proces při HSC**

Při zvyšování řezné rychlosti do oblasti vysokorychlostního obrábění dochází k zcela odlišným jevům než u klasického obrábění. V podmínkách HSC se teplota třísky přiblíží teplotě tavení obráběného materiálu a při určité řezné rychlosti dojde k náhlé změně řady metalurgických technologických vlastností třísky. Tříska zčervená a i zakalená ocelová tříska změkne a sníží svou přítláčnou sílu na čelo bříty. Třecí síla i celkový řezný odpor klesnou, zvětší se úhel smykové roviny, ztenčí se průřez třísky, zvýší se úhel jejího odchodu z kontaktní zóny, zúží se plocha kontaktní zóny a omezí se nárůst sekundární teploty třísky třením v kontaktní zóně. Tím vším se i při značném nárůstu tepla minimalizuje přechod tepla do obrobku i bříty nástroje a většina vygenerovaného tepla odchází s třískou a tím se omezí vznik difúzních mechanismů a mechanického vymílání čela nástroje. Růst teploty třísky se při dosažení určité řezné rychlosti zpomaluje a teplota dosahuje svého maxima 600 °C při obrábění hliníku, 1000 °C pro bronz, 1300 °C pro šedou litinu a 1500 °C pro ocel. [2]

### 2.2.6 Přednosti HSC obrábění

Výhod vysokorychlostního obrábění je mnoho, například nízká teplota řezného nástroje a obrobku v mnoha případech zvyšuje jejich životnost. Na druhou stranu při vysokorychlostním obrábění se využívají velmi mělké řezy a doba záběru je extrémně krátká. Dá se říct, že posuv je vyšší než rychlost šíření tepla materiálem.

Nízké řezné síly způsobují menší a stálou výchylku nástroje. V kombinaci s úběrem stále stejně silné vrstvy materiálu nástroji určenými pro konkrétní operaci je to jeden z předpokladů vysoce produktivního a bezpečného procesu.

Vzhledem k mělkým řezům při vysokorychlostním obrábění klesají radiální síly působící na nástroj a vřeteno. Tím se šetří ložiska vřetena, vodítka a kuličkové šrouby. Vysokorychlostní obrábění se dá dobře kombinovat s axiálním frézováním vzhledem k tomu, že nejsou příliš zatěžována ložiska vřetena a tato metoda umožňuje používat delší nástroje s nižším rizikem vibrací.

HSC umožňuje produktivní obrábění malých součástí. Hrubování, polodokončování a dokončování lze provádět úsporně, pokud je celkový úběr materiálu obrobku relativně malý.

Také produktivita obecného dokončování je vysoká a lze dosáhnout velmi dobré jakosti obrobeného povrchu, často až  $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ .

Je možné obrábět velmi tenké stěny, například stěnu silnou 0,2 mm a vysokou 20 mm, s použitím sousledného frézování. Doba kontaktu břitů s obrobkem musí být velmi krátká, aby nevznikaly vibrace a stěna obrobku se nevychylovala. Mikrogeometrie frézy musí být velmi pozitivní a břit velmi ostrý.

Vyšší geometrická přesnost forem a zápustek zjednodušuje a zrychluje montáž. Žádná obsluha obráběcího stroje, nezávisle na tom, jak je zkušená, nemůže dosáhnout struktury a geometrie povrchu vytvořené CAM/CNC řízením. Prodloužení doby obrábění o několik hodin může vést k významnému zkrácení potřebné doby pro leštění až o 60 - 100 %. [5]

#### **Hlavní výhody aplikace HSC obrábění:**

- dosažení vysoké kvality obráběného povrchu, zpravidla bez nebezpečí vzniku nežádoucích reziduálních pnutí na obrobeném povrchu;
- zvýšení objemu odebraného materiálu při hrubování [ $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ], resp. při

dokončování zvětšení obrobené plochy [ $\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ ] (zvýšení řezné rychlosti, zvýšení posuvové rychlosti);

- vlivem menšího přechovávání třísky se sníží řezné síly cca o 1/3;
- z důvodů vysoké řezné rychlosti je vzniklé teplo převážně odváděno třískami, výrazně se sníží tepelné zatížení nástroje a obrobku;
- zpravidla se sníží i pravděpodobnost vzniku chvění, protože vysoká budicí frekvence otáčení vřetena je mimo oblast samobuzeného kmitání;
- je možné výhodně aplikovat obrábění bez chlazení, které kromě ekonomických výhod (odpadají náklady na procesní kapaliny a jejich likvidaci) má i výrazné ekologické dopady.

Kromě uvedených výhod je třeba zvažovat i vybavení provozů pro obrábění vysokými řeznými rychlostmi. Toto vybavení mohou tvořit obráběcí stroje jak konvenční, tak i číslicově řízené s otáčkami frézovacích vřeten 10 000-80 000  $\text{min}^{-1}$ , otáčkami vřeten soustruhu 5 000-15 000  $\text{min}^{-1}$ , s výkony od 15 kW až po 60 kW, s maximální rychlostí pracovních posuvů 10-40  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ , rychloposuvů 90-120  $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$  a zrychlením až 2 g. [16]

### 2.2.7 Tepelná bilance HSC technologií

Ke vzniku tepla při HSC obrábění dochází transformací vynaložené práce. V teplo se přeměňuje veškerá práce vynaložená na řezání s výjimkou práce potřebné na pružné deformace a práce spotřebované na deformaci mřížky kovu a vytvoření nových povrchů. Pro HSC obrábění je možné předpokládat, že cca 98 % práce řezání se přemění v teplo.

Po matematických úpravách lze získat vztah, který vyjadřuje teplotu odvedené třísky:

$$Q_n = (6 \cdot P_c \cdot q \cdot q_t) / (G_t \cdot c_s) \quad [16]$$

$P_c$  ...pracovní výkon [kW];

$q$ .....podíl přeměněné práce v teplo (cca 98%) [%];

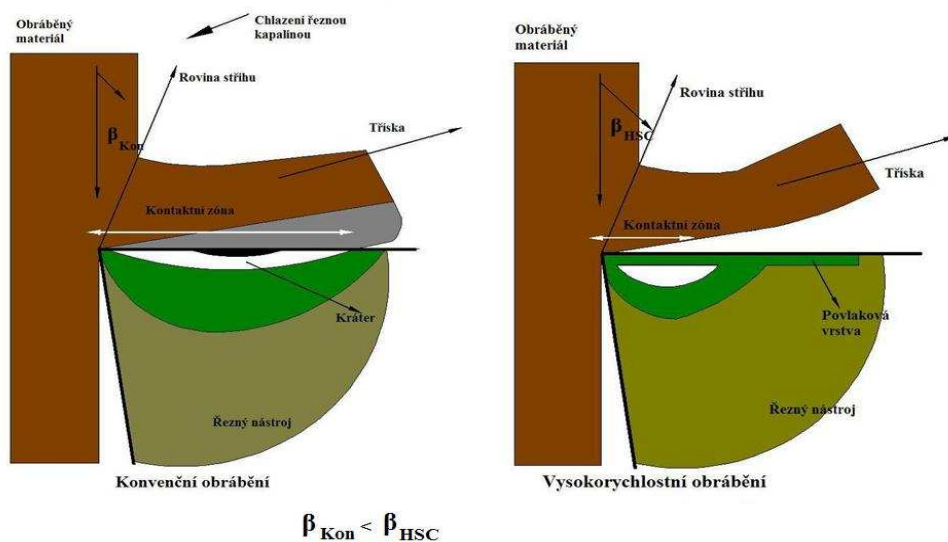
$q_t$ .....podíl tepla přecházejícího do třísky [%];

$G_t$ .....hmotnost třísek [ $\text{kg} \cdot \text{min}^{-1}$ ];

$c_s$ .....měrná tepelná kapacita [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]. [16]

### 2.2.8 Porovnání konvenčního a HSC řezného procesu

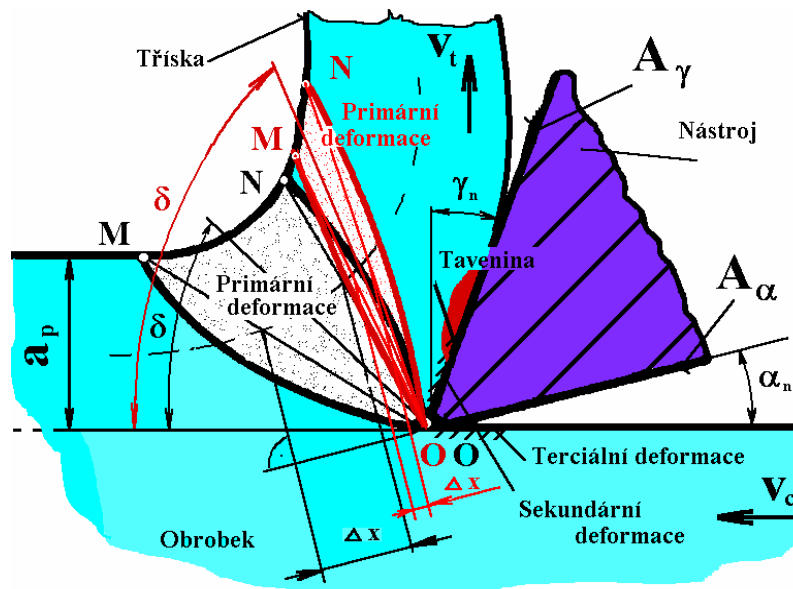
Obecně platí, že efektivní řezání kovů nastává, pouze když si řezný materiál při teplotě a v prostředí řezného procesu udrží výraznou převahu tvrdosti oproti obráběnému materiálu. Se vzrůstající řeznou rychlostí roste celkové množství tepla řezného procesu, a to téměř úměrně s narůstající rychlostí stříhu třísky a intenzitou tření třísky o nástroj. Plastickou deformaci třísky v rovině stříhu se rázem, skokově mění její teplota, která dále roste třením třísky o čelo nástroje. Princip HSC řezných pochodů lze vysvětlit s porovnáním konvenčních technologií. [3]



Obr.4: Porovnání konvenčního a vysokorychlostního obrábění [2].

Při konvenčním obrábění nastává ve smykové rovině mechanické zpevnění třísky a její ztvrdnutí oproti původnímu materiálu. Malý úhel v rovině stříhu, vyvolaný velkým odporem zpevněné třísky, zvyšuje tloušťku třísky i její odpor proti pohybu a zvětšuje plochu kontaktní zóny. Přítlačné i třecí síly mezi třískou a čelem nástroje nabývají vysokých hodnot a velká část třením vzniklého tepla přechází z třísky do nástroje. Třecí teplo a velká přítlačná síla třísky podporují difúzní procesy na čele nástroje a vyvolávají vymílání kráteru. Procesní teplo roste úměrně se zvyšováním rychlosti smyku třísky ve smykové rovině a s řezným odporem, který závisí na obráběném materiálu. Tvrdé a kalené materiály se za těchto podmínek nedají obrábět a řezná rychlost u běžných materiálů a konvenčních nástrojů vede k opotřebení a zkrácení životnosti nástroje.

V podmínkách vysokorychlostního obrábění mimořádně tvrdými a tepelně odolnými nástroji se teplota třísky přiblíží tavné teplotě obráběnému materiálu a při určité řezné rychlosti dojde k náhlé změně řady metalurgických, chemických i mechanických vlastností třísky. Tříska při průchodu rovinou stříhu zvýší v celém svém průřezu náhle svoji teplotu, zčervená i kalená ocelová tříska změkne a sníží svou přitlačnou sílu na čelo nástroje. Třecí síla i celkový řezný odpor klesne, zvětší-li se úhel smykové roviny, ztenčí se průřez třísky, zvýší se rychlost jejího odchodu z kontaktní zóny. Tříska „vystřelená“ z kontaktní zóny nemá čas předat teplo nástroji ani obrobku, tím se minimalizuje přenos tepla do nástroje i obrobku a vygenerované teplo odchází společně s třískou. Tím se při značném nárůstu procesního tepla omezí opotřebení nástroje. Důsledkem poklesu řezných sil a snížení tepelného toku do obrobku stoupne i přesnost obrábění [3].



Obr. 5 Porovnání vzniku tvoření třísky u „klasické“ a „HSC technologie“ [1]



### **3. Vliv řezných podmínek na integritu povrchu součásti**

#### **3.1 Vliv řezné rychlosti**

S rostoucí řeznou rychlostí se zužuje oblast primární plastické deformace. V oblasti obrábění se primární plastická deformace koncentruje do úzkého smykového pásu v okolí smykové roviny v důsledku omezené rychlosti šíření kluzu v polykrystalech. Rostoucí řezná rychlost způsobuje zmenšování intenzity plastické deformace a v HSC režimu nedochází téměř k plastické deformaci třísky [2].

##### **3.1.1 Vliv řezné rychlosti na řezné síly**

Řezná síla se zmenšuje s rostoucí řeznou rychlostí až do dosažení minima při řezné rychlosti charakteristické pro daný materiál. Poté má řezná síla tendenci k růstu s rostoucí řeznou rychlostí. Smyková síla v oblasti nižších řezných rychlostí roste se zvětšující řeznou rychlostí vlivem deformačního zpevnění. Od určité výše řezných rychlostí se začne uplatňovat tepelné opevňování a smyková síla klesá a teoreticky se blíží k nule. U vysokorychlostního obrábění přechází podíl snižujícího tepla do obrobku. Povrchová vrstva je méně tepelně namáhána a nevzniká nežádoucí tahové pnutí na povrchu obrobku (vznik trhlin). Snížením teploty povrchu nedochází ani ke strukturním změnám v povrchových vrstvách. To je důležité zvláště u obrábění kalených materiálů, u kterých by vysoká teplota povrchu způsobila popuštění a ztrátu tvrdosti [2].

##### **3.1.2 Vliv řezné rychlosti na trvanlivost břitu nástroje**

Při zvyšování řezné rychlosti se zvyšuje střední teplota řezání k bodu tavení obráběného materiálu. Teplota tavení obráběného materiálu představuje maximální teplotu řezání pro daný materiál. Intenzita opotřebení břitu je obvykle závislá na teplotě řezání, tvoří v opotřebení omezující faktor pro zvyšování řezné rychlosti. Výjimku tvoří obrábění hliníku, protože jeho teplota tavení je pouze 600-660°C. Z tohoto důvodu je doposud

obrábění hliníku technologií HSC nejrozšířenější.

Při HSC obrábění ovlivňují trvanlivost břitu dva druhy otěru. Jsou jimi chemické rozpouštění a difúze. Chemické rozpouštění je nejdůležitější příčinou opotřebení, v podstatě se řezný materiál rozpouští v odcházející třísce. Druhým mechanismem je otěr limitovanou difúzí. Při zvyšující se řezné rychlosti dosáhne teplota řezání takové úrovně, při které se materiál třísky navaňuje na čelo břitu. Vznikne vrstva materiálu, která se postupně nasycuje difundujícími prvky z řezného materiálu. Toto nasycení způsobuje snížení koncentračního spádu mezi břitem a navařenou vrstvou a intenzita opotřebení břitu klesá. Protože se však difuze exponenciálně zvyšuje s narůstající teplotou, vytváří další zvýšení řezné rychlosti nad bod minimálního opotřebení již rychlý nárůst intenzity opotřebení [2].

### ***3.2 Velikost posuvu, hloubka řezu***

Hodnoty posuvů a hloubky řezu mají u HSC obrábění stejný vliv jako u konvenčního obrábění. Jejich hodnoty jsou úzce závislé na mnoha faktorech a tyto hodnoty se musí vždy striktně dodržet v určitém rozmezí. Především při obrábění tvarových ploch se musí dodržet vhodná strategie úběru materiálu obrobku. V koutech a ostrých přechodech se může velikost hloubky řezu značně měnit. Vhodnou strategii odebírání materiálu zajišťují vyspělé CAD/CAM systémy. Při špatně zvolené strategii odebírání materiálu může být ovlivněna celá stabilita procesu řezání.

Vliv hloubky řezu a velikosti posuvu na některé jevy:

- S rostoucí velikostí posuvu klesá součinitel přechovávání, rostou řezné síly, roste střední teplota řezání a snižuje se trvanlivost břitu (pro stejnou  $v_c$ ).
- S rostoucí velikostí hloubky řezu klesá měrný řezný odpor, klesá součinitel přechovávání, roste střední teplota řezání, rostou řezné síly a snižuje se trvanlivost břitu (pro stejnou  $v_c$ ). Roste také úhel smykové roviny a zužuje se oblast primární plastické deformace.

Pro velikosti řezných sil a jejich minimalizaci je nejvhodnější čtvercový průřez třísky. Nevhodný je průřez třísky s velkou šířkou a malou tloušťkou, protože zvyšuje velikost normálové složky řezné síly, která negativně ovlivňuje kvalitu povrchu a přesnost obrábění.

Velikost normálové složky síly řezání je nutné minimalizovat především při dokončování dlouhými štíhlými nástroji [2].

### ***3.3 Vliv řezných podmínek na kvalitu obrobeného povrchu***

Kvalitu povrchu je třeba chápat jako integrovanou charakteristiku strojních součástí. Kvalita obrobeného povrchu je charakterizovaná:

- **geometrií obrobeného povrchu** (rozměrová přesnost, odchylky geometrického tvaru a polohy, vlnitost, drsnost aj.),
- **fyzikálně-mechanickými vlastnostmi povrchové vrstvy** – tvrdost, zpevnění a zbytková napětí,
- **fyzikálně-chemickým stavem povrchu.**

Stav a kvalita povrchové vrstvy obrobeného kovu má vliv na únavovou pevnost, odolnost proti opotřebení, protikorozní stabilitu, na kvalitu lícování apod. Studium vlastností povrchové vrstvy napomáhá hodnocení vlivů technologických procesů a pracovních podmínek na kvalitu povrchové vrstvy obrobku.

Při vysokorychlostním obrábění dochází vlivem rychlosti k zúžení oblasti primární plastické deformace do úzkého pásu ve smykové rovině. Plastická deformace je velmi malá a téměř nezasahuje pod rovinu řezu. Velikost zpevnění povrchové vrstvy tedy závisí pouze na terciální plastické deformaci. Použitím HS technologií se intenzita zpevnění povrchové vrstvy sníží a hloubka zpevnění  $h_z$  je velice malá. [2]

Další výhodou vysokorychlostního obrábění je snížený podíl tepla přecházejícího do obrobku. Povrchová vrstva je méně tepelně namáhána a nevzniká nepříznivé tahové pnutí na povrchu obrobku (vznik trhlin). Snížením teploty povrchu nedochází ani ke strukturním změnám v povrchových vrstvách. To je důležité zvláště u obrábění kalených materiálů, u kterých by vysoká teplota povrchu způsobila popuštění a ztrátu tvrdosti. [2]

Tvarová přesnost a drsnost obrobku je závislá také na stabilitě procesu řezání. Pro dosažení stability musí být frekvence vynucených kmitů a samobuzeného kmitání rozdílná od vlastní frekvence některého určujícího členu systému. Nemůže tedy dojít k rezonanci.

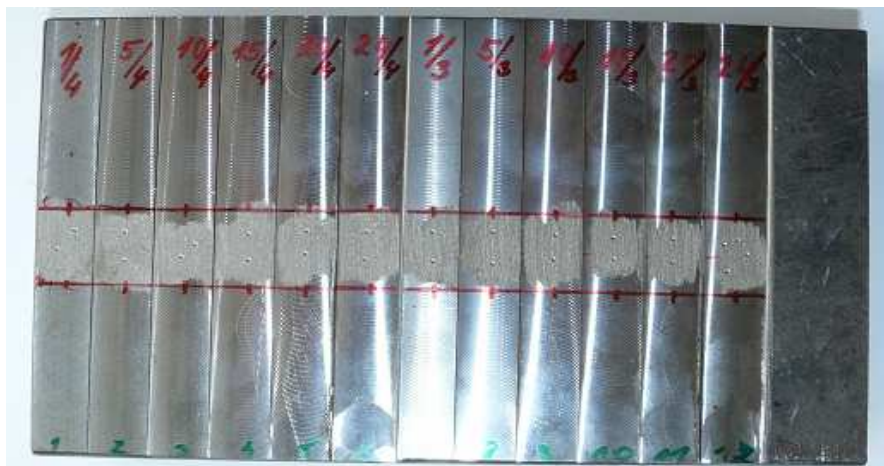
Důraz na topografii povrchu se klade u HS obrábění především při dokončovacím obrábění. Na topografii povrchu ovšem nemá velký vliv samotná HS technologie, ale především řada faktorů, které se v procesu vyskytují. Jedná se především o statickou

a dynamickou tuhost celého systému, sestávajícího z nástroje, stroje a obrobku. Dynamické namáhání soustavy S-N-O řeznými silami má rovněž zásadní vliv na stabilitu řezného procesu a tím na přesnost obrobku a kvalitu (integritu) obrobeného povrchu. [2]

## 4. Experimentální ověření vlivu řezných parametrů

Experimentální část práce byla prováděna za spolupráce Institute of Mechanical Technology z Poznan University of Technology v Polsku. Upřímné poděkování patří zejména panu prof. Stanislawu LEGUTKOVI, DSc., PhD., MSc., Eng. za umožnění provedení experimentů v laboratořích Institute of Mechanical Technology a aktivní pomoc při praktickém uskutečnění experimentu.

Při experimentální části byla hodnocena drsnost povrchu, zbytková pnutí a tvrdost povrchu v závislosti na navržených řezných parametrech a použitých řezných nástrojích. Materiály byly ocel 12050.1 a 15128. Experiment byl proveden na stroji DMU 60 monoBLOCK od výrobce Deckel Maho při experimentu se používal nástroj použitím od firmy KENNAMETAL. Před vlastním testováním povrchu se frézovaný materiál zarovnal konvenčním frézováním na stejném stroji.



Obr. 6 Vzorek materiálu oceli 12050.1



Obr. 7 Vzorek materiálu oceli 15128

#### 4.1 Použitý stroj

Univerzální 5ti osé CNC frézovací centrum DMU 60 MonoBlock® s NC otočným stolem firmy Deckel Maho. Frézovací centrum DMU 60 MonoBlock® patří mezi vysoce produktivní obráběcí stroje se zajištěnou požadovanou přesností. Modulární monoBLOCK® koncept zajišťuje nezbytnou tuhost a také nabízí optimální ergonomii a uživatelskou přívětivost. Stroj je vybaven DMG řídicím panelem s 15" TFT obrazovkou a 3D softwarem. Řídicím systémem stroje je Heidenhain iTNC 530.



Obr. 8 Univerzální frézovací centrum DMU 60 monoBLOCK® [8]

Tab. 1 Vybrané technické parametry stroje DMU 60 monoBLOCK® [9]

|                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|
| Počet řízených os:            | 5 os                          |
| Pracovní rozsah X/Y/Z:        | 730 / 560 / 560 mm            |
| Točivý moment:                | 130 Nm                        |
| Rozsah otáček vřetene:        | 1 24 000 min <sup>-1</sup>    |
| Upínací plocha stolu:         | 1000 x 600 mm                 |
| Pracovní posuv a rychloposuv: | 30 / 30 / 30 m/min<br>(X/Y/Z) |
| Výkon motoru:                 | 15 kW                         |
| Maximální hmotnost obrobku:   | 700 kg                        |
| Řídicí systém:                | Heidenhain iTNC 530           |

Pro ustavení obrobku byla použita optická strojní sonda RENISHAW OMP60 s optickým systémem OMI-2. OMP60 je sonda určená k použití ve středních až velkých obráběcích a frézovacích centrech.

Tab.2 Vybrané technické parametry sondy REINSHAW OMP60 [10]

|                         |                                       |
|-------------------------|---------------------------------------|
| Délka sondy:            | 76 mm                                 |
| Průměr sondy:           | 63 mm                                 |
| Typ přenosu signálu:    | 360° infračervený optický přenos      |
| Pracovní dosah signálu: | až 6 m                                |
| Směry snímání:          | vícesměrové: $\pm X$ , $\pm Y$ , $+Z$ |
| Max. akcelerace:        | 150 m/s <sup>2</sup> s 50 mm dotekem  |
| Krytí:                  | IPX8                                  |

*Obr. 9 Optická sonda OMP60/OMI-2 s modulovaným systémem přenosu [11]*

Sonda OMP60 společně s kombinovanou jednotkou vysílače/přijímače/interface OMI-2 vykazují zvýšenou odolnost proti světelným interferencím. Kombinovaný optický vysílač/přijímač/interface je primárně určený pro přenášení a zpracování signálů mezi inspekční sondou a řídicím systémem CNC stroje.

Tab.3 Vybrané techn. parametry kombinovaného vysílače/přijímače/interface OMI-2 [10]

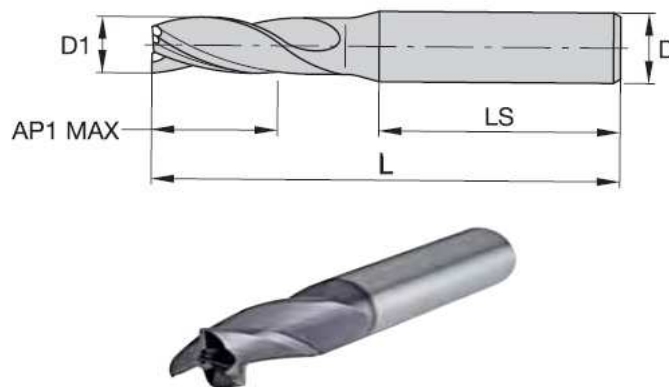
|           |              |
|-----------|--------------|
| Hloubka:  | 46,7 mm      |
| Průměr:   | 84 mm        |
| Napájení: | 12 V až 30 V |
| Krytí     | IPX8         |

## 4.2 Použité nástroje

K provádění experimentu byly použity frézy od společnosti Kennametal Europe GmbH. Společnost Kennametal je řazena mezi přední světové dodavatele nástrojů, obráběných komponentů a moderních materiálů používaných ve výrobních procesech. Konkrétně byly použity frézy s označením F3AH1800ADL30, F4AJ1800ADN30 a F3AH1600ADL30.

### Popis frézy F3AH1800ADL30

Jedná se o karbidovou tříbřitou stopkovou frézu o průměru 18 mm se stoupáním šroubovice  $30^\circ$ . Použití frézy je vhodné pro vysokoproduktivní obrábění díky tuhému tělesu a konstrukci s dostatečně velkou zubovou mezerou, která zaručuje bezproblémový odvod třísek i při vysokých rychlostech řezání. Nástroj je vhodný také pro dokončovací frézování. Primárně je fréza určena pro obrábění materiálů P, M, K, S a alternativně pro obrábění materiálů N.



Obr. 10 Fréza F3AH1800ADL30 [15]

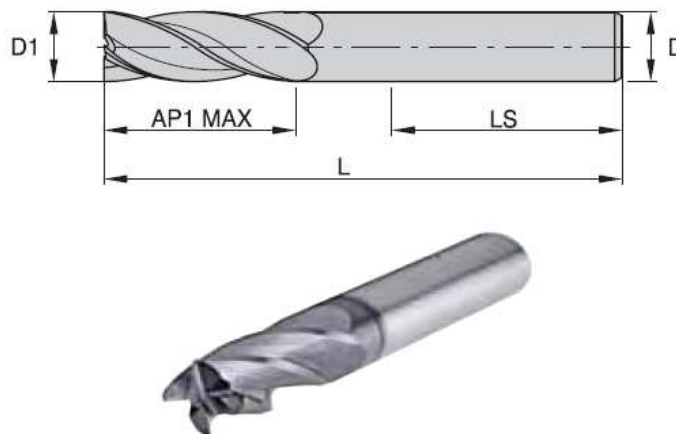
Tab. 4 Rozměry frézy F3AH1600ADL30 [15]

| D1<br>[mm] | D<br>[mm] | Ap1 max<br>[mm] | LS<br>[mm] | L<br>[mm] |
|------------|-----------|-----------------|------------|-----------|
| 18         | 18        | 26              | 48         | 92        |



### Popis frézy F4AJ1800ADN30

Jedná se o karbidovou čtyřbřitou stopkovou frézu o průměru 18 mm se stoupáním šroubovice 30°. Použití frézy je obdobné jako u frézy F3AH1600ADL30.



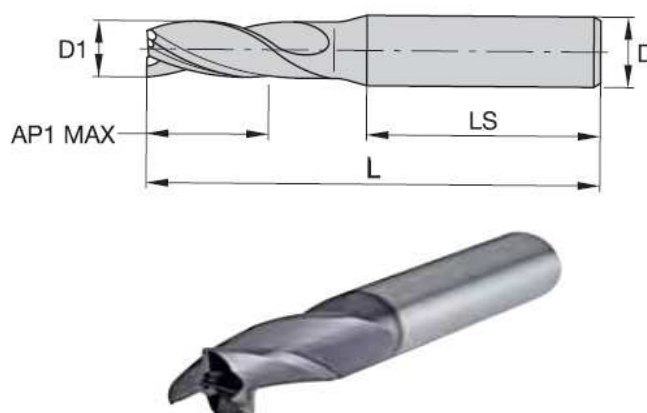
Obr. 11 Fréza F4AJ1800ADN30 [15]

Tab. 5 Rozměry frézy F4AJ1800ADN30 [15]

| D1<br>[mm] | D<br>[mm] | Ap1 max<br>[mm] | LS<br>[mm] | L<br>[mm] |
|------------|-----------|-----------------|------------|-----------|
| 18         | 18        | 32              | 48         | 92        |

### Popis frézy F3AH1600ADL30

Jedná se o karbidovou tříbřitou stopkovou frézu o průměru 16 mm se stoupáním šroubovice 30°. Použití frézy je vhodné pro vysokoproduktivní obrábění díky tuhému tělesu a konstrukci s dostatečně velkou zubovou mezerou, která zaručuje bezproblémový odvod třísek.



Obr. 12 Fréza F3AH1600ADL30 [15]

Tab. 6 Rozměry frézy F3AH1600ADL30 [15]

| D1<br>[mm] | D<br>[mm] | Ap1 max<br>[mm] | LS<br>[mm] | L<br>[mm] |
|------------|-----------|-----------------|------------|-----------|
| 16         | 16        | 26              | 48         | 92        |

Všechny použité frézy jsou celokarbidové s PVD vícevrstevným povlakováním vrstvami TiN, TiCN a TiC(N). Ve srovnání s chemickou metodou povlakování CVD dosahuje fyzikálně nanesený PVD povlak TiN velmi výrazně lepších výsledků z hlediska opotřebení bříty nástroje. Uvedené povlaky se používají zpravidla pro tvrdé a suché obrábění. Pro HSC musí být systémy povlaků zpravidla s co nejmenší tloušťkou, často < 10 µm neboť větší tloušťky zvětšují zaoblení řezné hrany, což negativně působí na přesnost, drsnost a celkově na proces řezání.



Obr. 13 Schéma vícevrstvého povlaku frézy [15]

### 4.3 Zkušební materiály

#### Ocel 12 050.1

Uhlíková ocel k zušlechťování a povrchovému kalení 12 050.1 normalizačně žilhaný (ČSN 41 2050).

Tab. 7 Zahraniční ekvivalenty označení oceli 12 050.1

|                |                            |
|----------------|----------------------------|
| ISO            | C60E4 ISO 683-1-87         |
| EURO           | C45 EN 10083-2-91          |
| Německo        | C45 DIN 17200-84 ( 1.1191) |
| Velká Británie | C45 BS EN 100083-2-91      |
| USA            | Gr.1043 ASTM A510          |

Tab. 8 Chemické složení oceli 12 050.1

| Obsah prvků | C            | Mn           | Si           | Cr          | Ni          | Cu          | P            | S            |
|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| [%]         | 0,42<br>0,50 | 0,50<br>0,80 | 0,17<br>0,37 | max<br>0,25 | max<br>0,30 | max<br>0,30 | max<br>0,040 | max<br>0,040 |

Tab. 9 Mechanické vlastnosti oceli 12 050.1

|                            |              |
|----------------------------|--------------|
| Mez kluzu $R_{p0,2}$       | min. 325 MPa |
| Mez pevnosti $R_m$         | min. 540 MPa |
| Tažnost A5                 | min 17 %     |
| Tvrdost                    | max 225 HB   |
| Modul pružnosti v tahu E   | 211 GPa      |
| Modul pružnosti ve smyku G | 79 GPa       |

Použití: Materiálem je ukladná ocel vhodná na hřídele těžebních strojů, turbokompresorů, karuselů, na větší ozubená kola, šneky, ozubené věnce, rotory šroubových kompresorů, ojnice, pístnice, vřetena, písty kompresorů, čepy, šrouby, dopravní válečky, lamely spojek a další.

### Ocel 15 128 Cr-Mo-V ČSN 41 5128

Tab. 10 Chemické složení oceli 15 128

| Obsah prvků | C            | Mn           | Si           | Cr           | Mo           | V            | P            | S            |
|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| [%]         | 0,10<br>0,18 | 0,45<br>0,70 | 0,15<br>0,40 | 0,50<br>0,75 | 0,40<br>0,60 | 0,22<br>0,35 | max<br>0,040 | max<br>0,040 |

Použití: Ocel náleží do kategorie nízkolegovaných svařitelných žárupevných ocelí. Ocel je charakteristická zvýšenou žárupevností, garantovanou výrobcem v teplotní oblasti do 600°C. Používá se především na kotlové trubky.

### Řezné parametry použité při experimentu:

Tab.11 Řezné parametry použité při experimentu pro ocel 12050.1

| Ocel 12050.1 (1. část)                          |                        |                      | Ocel 12050.1 (2. část)                          |                        |                      |
|---|------------------------|----------------------|---|------------------------|----------------------|
| $a_p=0,25$ mm; $f_z=0,25$ mm; $D1=18$ mm; $z=4$ |                        |                      | $a_p=0,25$ mm; $f_z=0,33$ mm; $D1=18$ mm; $z=3$ |                        |                      |
| Plocha  | rychlost posuvu $v_f$  | otáčky n             | Plocha  | rychlost posuvu $v_f$  | otáčky n             |
|   | [m.min <sup>-1</sup> ] | [min <sup>-1</sup> ] |   | [m.min <sup>-1</sup> ] | [min <sup>-1</sup> ] |
| 1   | 1                      | 1000                 | 7   | 1                      | 1000                 |
| 2   | 5                      | 5000                 | 8   | 5                      | 5000                 |
| 3   | 10                     | 10000                | 9   | 10                     | 10000                |
| 4   | 15                     | 15000                | 10  | 15                     | 15000                |
| 5   | 20                     | 20000                | 11  | 20                     | 20000                |
| 6   | 24                     | 24000                | 12  | 24                     | 24000                |

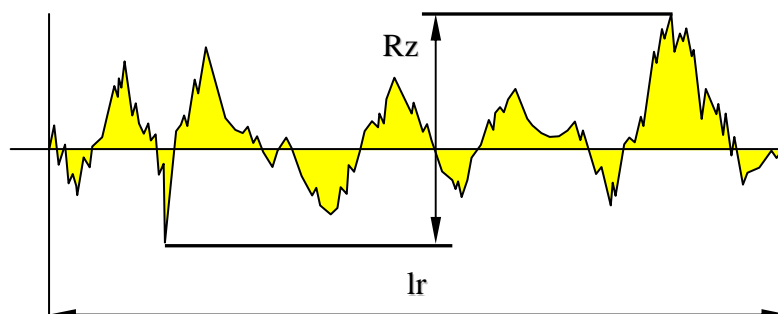
Tab.12 Řezné parametry použité při experimentu pro ocel 15128

| Ocel 15128 (1. část)                            |                        |                      | Ocel 15128 (2. část)                            |                        |                      |
|---|------------------------|----------------------|---|------------------------|----------------------|
| $a_p=0,25$ mm; $f_z=0,25$ mm; $D1=18$ mm; $z=4$ |                        |                      | $a_p=0,25$ mm; $f_z=0,33$ mm; $D1=16$ mm; $z=3$ |                        |                      |
| Plocha  | rychlost posuvu $v_f$  | otáčky $n$           | Plocha  | rychlost posuvu $v_f$  | otáčky $n$           |
|   | [m.min <sup>-1</sup> ] | [min <sup>-1</sup> ] |   | [m.min <sup>-1</sup> ] | [min <sup>-1</sup> ] |
| 23  | 5                      | 1000                 | 28  | 5                      | 1000                 |
| 24  | 10                     | 5000                 | 29  | 10                     | 5000                 |
| 25  | 15                     | 15000                | 30  | 15                     | 15000                |
| 26  | 20                     | 20000                | 31  | 20                     | 20000                |
| 27  | 24                     | 24000                | 32  | 24                     | 24000                |

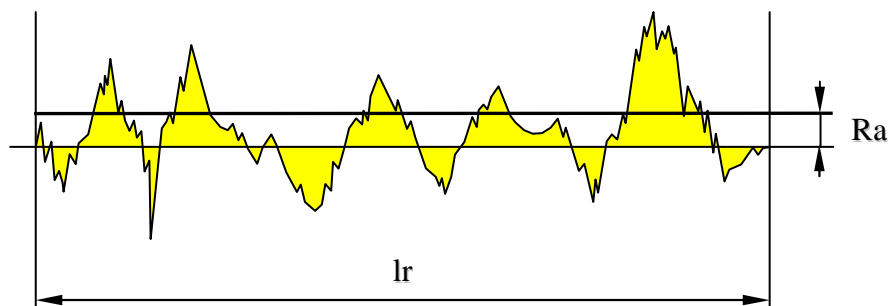
#### 4.4 Stanovení drsnosti povrchu

##### 4.4.1 Parametry drsnosti povrchu (výškové parametry)

**Největší výška profilu  $R_z$**  – jako součet výšky **Z<sub>p</sub>** nejvyššího výstupku profilu a hloubky **Z<sub>v</sub>** nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky [19].

Obr. 14 Největší výška profilu  $R_z$  [18];

**Průměrná aritmetická úchylka  $R_a$**  - Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu  $R_a$  je nejužívanějším parametrem hodnocení struktury povrchu. Představuje průměrnou hodnotu drsnosti na základní délce. [19].

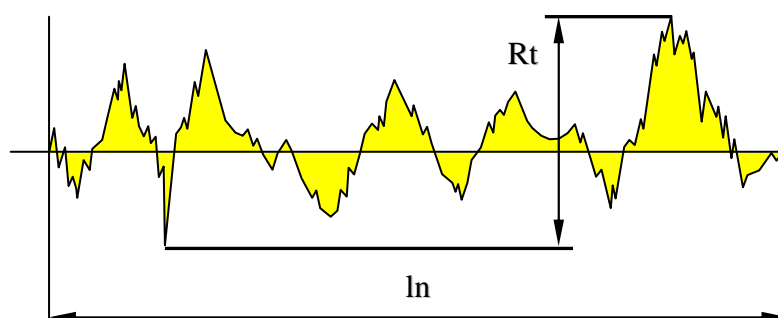


Obr. 15 Průměrná aritmetická úchylka  $R_a$  [18]

Většina národních a mezinárodních norem doporučuje provádět hodnocení  $R_a$  na pěti po sobě jdoucích základních délkách a ze získaných dat je stanovena průměrná hodnota. Tím je zajištěno, že výsledná hodnota skutečně reprezentuje kontrolovaný povrch. Při hodnocení z více nebo méně základních délek než pěti se mění statistická přesnost výsledku měření.

Význam hodnoty  $R_a$  je podmíněn správnou volbou a uvedením základní délky. Měření by mělo být dle možnosti prováděno ve směru kolmém na stopy po dokončování.  $R_a$  nedává žádné informace o tvaru nerovností povrchu (při stejné hodnotě  $R_a$  se mohou povrchy lišit nejen tvarem, ale i maximální výškou mezi výstupky a prohlubněmi. Z definice vyplývá, že  $R_a$  nerozlišuje mezi výstupky a prohlubněmi [19].

**Rozměry výstupků a prohlubní** - Někdy je vhodné a užitečné místo  $R_a$  využít hodnoty výšky největšího výstupku a hloubky nejnižší prohlubně. Tomu odpovídá parametr  $R_t$ , definovaný jako vzdálenost mezi nejvyšším a nejnižším bodem profilu v rozsahu vyhodnocované délky [19].

Obr. 16 Celková výška profilu  $R_t$  ( $\mu\text{m}$ ) [18]

Při využití výškových parametrů je třeba v každém případě dodržet délku profilu, na které jsou v souladu s definicí určovány.

Tedy:

$R_t$  je celková výška profilu, definovaná na vyhodnocované délce.

$R_z$  představuje největší výšku profilu v rozsahu základní délky.

$R_p$  pak největší výšku výstupku od střední čáry profilu v rozsahu základní délky.

Pro využití parametru  $R_t$  je důležité, že jeho určení nevychází ze střední čáry a jeho velikost je přímo ovlivněna rýhami nebo nečistotami na kontrolovaném povrchu [19].

#### 4.4.2 Použité zařízení pro měření drsnosti vzorků

Měření parametrů drsnosti povrchu bylo provedeno na dotykovém měřicím přístroji - drsnoměru SurfTest SJ-401 společnosti MITUTOYO v prostorách Katedry obrábění a montáže Fakulty strojní VŠB-TU Ostrava.

SJ-401 je dotykový (hrotový) přístroj pro měření drsnosti povrchů určený pro dílenské použití. Přístroj SJ-401 umožňuje hodnocení struktury povrchu, vlnitosti povrchu a mnoha dalších parametrů podle různých národních a mezinárodních norem. Vyhodnocuje až 46 parametrů. Naměřené hodnoty se zobrazují digitálně nebo graficky na dotykovém displeji, s možností výstupu na zabudované tiskárně.

Tab.12 Technické parametry drsnoměru SJ 401[14]

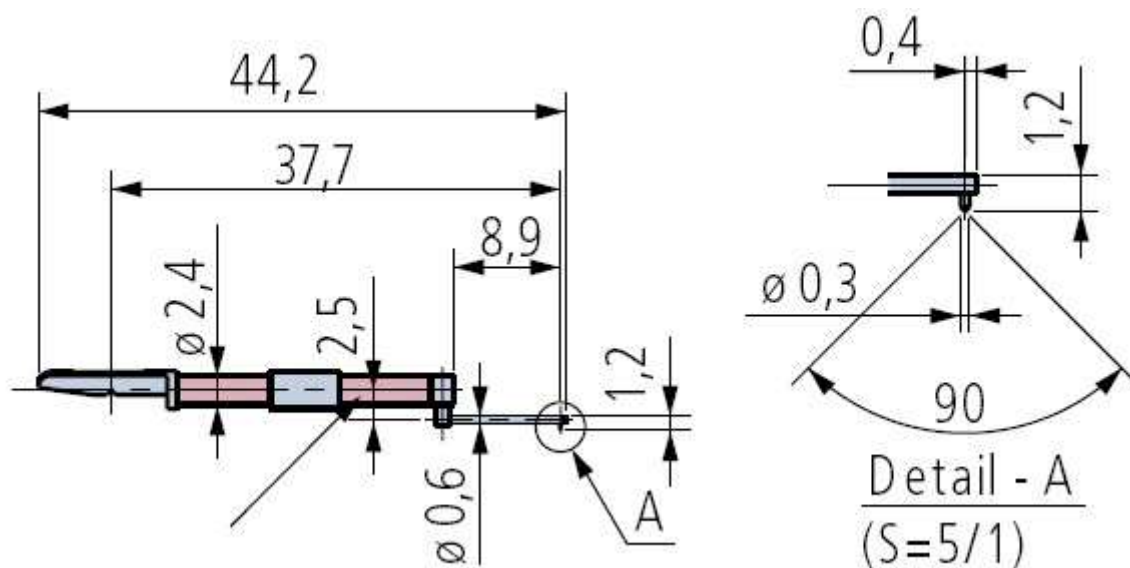
|                       |                                 |
|-----------------------|---------------------------------|
| Rozsah osy X (posuv): | 25 mm                           |
| Rozsah osy Z (zdvih): | 800 $\mu$ m                     |
| Měřicí rychlost:      | 0,05; 0,1; 0,5; 1,0 mm/s        |
| Zpáteční rychlost:    | 0,5; 1,0; 2,0 mm/s              |
| Posuv (rozsah osy X): | 25 mm (SJ-401) a 50 mm (SJ-402) |
| Zdvih (rozsah osy Z): | 800 mm                          |
| Provozní teplota:     | 5 °C až 35 °C                   |
| Relativní vlhkost:    | 85 % relativní vlhkosti         |



Obr. 17 Použitý měřicí přístroj pro měření drsnosti povrchu vzorků [14]

### Použitý snímací dotek

Bylo použito provedení snímače s označením 12AAC733 a rádius hrotu snímače  $2\text{ }\mu\text{m}$  (viz obr.14 ). Minimální rozlišení je  $0,000125\text{ }\mu\text{m}$ , měřicí síla  $4\text{ mN}$ .



Obr. 18 Snímací dotek 12AAC733 [14]

### Princip měření drsnosti povrchů přístrojem SJ-401

Dotkový hrot snímací jednotky přístroje SJ-400 zaznamenává drobné nepravidelnosti povrchu měřeného výrobku. Drsnost povrchu se stanoví na základě vertikálního posunu dotkového hrotu způsobeného přejížděním hrotu po povrchu. Parametry měření byly následující:

- základní délka profilu (cut-off)  $l_r = 0,8\text{ mm}$ ,
- rychlost snímání:  $0,5\text{ mm.s}$ ,
- použitý filtr: Gaussův,

### Vyhodnocování dat

K vyhodnocení dat byl použit software SJ-Tools použitelný pro drsnoměry SJ-201, SJ-301, SJ-401. Vyhodnocovací software je vytvořen na bázi programu Excel firmy Microsoft. Umožňuje tedy řízení měřicího přístroje, definici podmínek měření, grafické zobrazení profilu měření, archivaci měřicího protokolu a dokumentaci naměřených výsledků.

K správnému vyhodnocení měření drsnosti povrchu, musíme k výsledku vypočítat nejistotu, tzn. stanovit s jakou nejistotou bylo toto měření prováděno. Měření bylo

prováděno pětikrát v příčném a podélném směru. Podélným směrem rozumíme takový směr, který rovnoběžný se směrem posuvu frézy, příčným směrem pak směr na kolmý na posuv nástroje.

### **Nejistoty měření a jejich vyjadřování**

Pojem nejistota je relativně nový a v současné době velmi aktuální. Nejistotou se rozumí parametr charakterizující rozsah (interval) hodnot kolem výsledku měření, který můžeme odůvodněně přiřadit hodnotě měřené veličiny. Může se týkat výsledku měření, ale také hodno odečtených na použitých přístrojích, hodnot použitých konstant, korekce atd. na kterých nejistota výsledku závisí. Základní charakteristikou nejistoty je standardní nejistota  $u$ , která je vyjádřena hodnotou směrodatné odchylky  $s(x)$ , při normálním rozdělení:  $p=68,27\%$ . [20]

Pro každou měřenou plochu drsnosti povrchu zkoušených materiálů byla stanovena standardní nejistota typu A ( $u_A$ ), standardní nejistota typu B ( $u_B$ ) a kombinovaná standardní nejistota ( $u_C$ ).

Standardní nejistota typu A ( $u_A$ ) se zjistí výpočtem směrodatné odchylky  $s(\bar{x})$  :

$$u_A = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}$$

kde:  $u_A$  – je standardní nejistota typu A

$s(\bar{x})$  – je směrodatná odchylka

$\bar{x}$  - je střední hodnota

$x_i$  – je naměřená hodnota

$n$  – je rozsah výběru

Standardní nejistota typu B ( $u_B$ ) vychází z odhadu na základě zkušeností, vytipováním možných zdrojů nejistot. Tato byla určena po konzultacích s pracovníky metrologických laboratořích ve Vítkovicích. Její stanovení vychází z předpokladu vlivu opěrné patky snímacího hrotu a nejistoty samotného přístroje .



Standardní nejistota typu B ( $u_B$ ) je dána vztahem:

$$u_b = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2}$$

kde:  $u_B$  – je standardní nejistota typu B

$u_{B1}$  – je nejistota vlivu opěrné paty snímacího hrotu

$u_{B2}$  – nejistota měřicího přístroje

Hodnota  $u_{B1}$  byla stanovena pro normální rozdělení hustoty pravděpodobnosti vztahem:

$$u_{B1} = \frac{Z_3 \max}{\sqrt{3}}$$

kde:  $u_{B1}$  - je nejistota vlivu opěrné patky snímacího hrotu

$Z_{3\max}$ -byla stanovena na  $\pm 3\%$  pro daný měřicí přístroj

Hodnota  $u_{B2}$  byla stanovena na  $\pm 3\%$  z naměřené hodnoty pro daný měřicí přístroj

Kombinovaná nejistota ( $u_C$ ) je dána vztahem:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

kde:  $u_C$  – je kombinovaná standardní nejistota

$u_A$  – je standardní nejistota typu A

$u_B$  – je standardní nejistota typu B

Rozšířená kombinovaná nejistota je vyjádřena vztahem:

$$U_C = k_u \cdot u_c$$

kde:  $U_C$  – je rozšířená kombinovaná nejistota

$u_C$  – je kombinovaná standardní nejistota

$k_u$  – je koeficient rozšíření (pokrytí), byl stanoven na  $k_u = 2$  [20]

### **Testování hodnot podezřelých na zatížení hrubou chybou**

Hrubé chyby, které vznikají nesprávným provedením měření, nesprávným odečtením měření, nesprávným způsobem zpracování, vadou přístroje, nesprávnou manipulací s měřidlem, musí být ze souboru naměřených hodnot vyloučeny. V našem případě se však taková hrubá chyba po přepočítání nevyskytla.

- 1) Ze souboru naměřených hodnot  $x_1 < x_2 < \dots < x_n$  se vypočítá střední hodnota:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{kde: } \bar{x} - \text{je střední hodnota, } n - \text{je rozsah výběru}$$

výběrová směrodatná odchylka

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

kde:  $s(x)$  - je výběrová směrodatná odchylka

$\bar{x}$  - je střední hodnota

$x_i$  - je naměřená hodnota

$n$  - je rozsah výběru

- 2) Pro posouzení odlehlosti podezřelých hodnot souboru ( $x_2, x_n$ ) se vypočítají normované hodnoty  $H_2, H_n$  ( $x_2 < \bar{x}, x_n > \bar{x}$ ):

$$H_2 = \frac{\bar{x} - x_2}{s(x)}$$

$$\text{popřípadě } H_2 = \frac{x_n - \bar{x}}{s(x)}$$

kde:  $H_2, H_n$  - normované hodnoty

$s(x)$  - je výběrová směrodatná odchylka

$\bar{x}$  - je střední hodnota

$x_i$  - je naměřená hodnota

$n$  - je rozsah výběru

- 3) Z tabulek se určí mezní hodnota  $H$  pro předem stanovenou pravděpodobnost  $p$  a počet měření v souboru  $n$ .

Mezní hodnota pro pravděpodobnost  $p = 95\%$  a pro počet měření  $n = 5$  činí  $H = 2,18$ .

Za předpokladu, že  $H_2 < H$  a  $H_n < H$  hodnota  $x_2$  není zatížena hrubou chybou a ponechává se v souboru, ale hodnota  $x_n$  je ovlivněna chybou a ze souboru naměřených hodnot se vyloučí

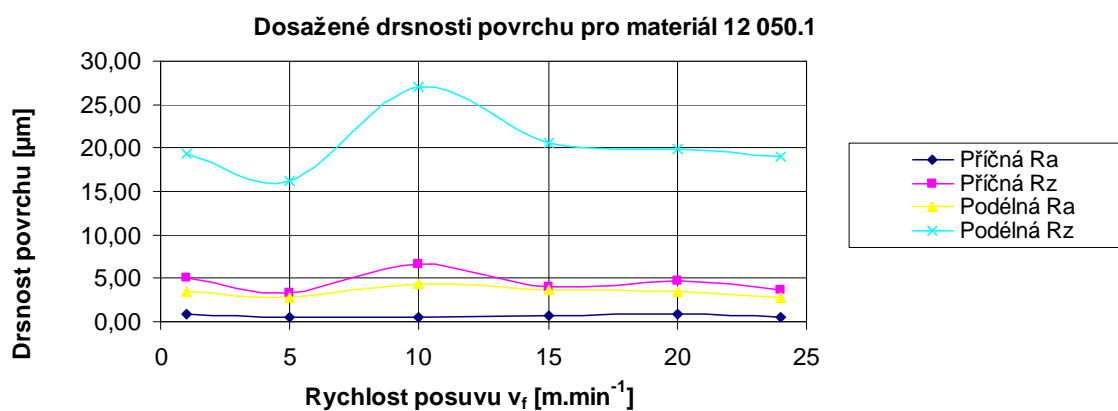
### 4.4.3 Tabulky a grafy naměřených hodnot drsností povrchu

Tab. 13 Hodnoty parametru drsnosti Ra materiálu 12050.1 při obrábění 4-břítou frézou

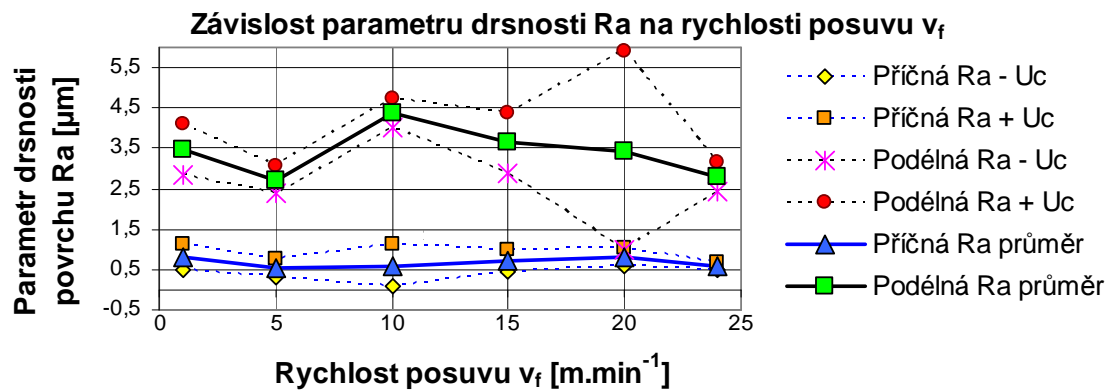
| Parametr drsnosti Ra |                        |             |        |              |        |
|----------------------|------------------------|-------------|--------|--------------|--------|
| pl.<br>č.            | vf                     | příčný směr |        | podélný směr |        |
|                      |                        | Ra          |        | Ra           |        |
| -                    | [m.min <sup>-1</sup> ] | [μm]        |        | [μm]         |        |
| 1                    | 1                      | 0,81        | ± 0,30 | 3,47         | ± 0,62 |
| 2                    | 5                      | 0,54        | ± 0,22 | 2,71         | ± 0,34 |
| 3                    | 10                     | 0,60        | ± 0,51 | 4,39         | ± 0,36 |
| 4                    | 15                     | 0,73        | ± 0,27 | 3,63         | ± 0,75 |
| 5                    | 20                     | 0,81        | ± 0,21 | 3,44         | ± 2,46 |
| 6                    | 24                     | 0,60        | ± 0,08 | 2,79         | ± 0,36 |

Tab. 14 Hodnoty parametru drsnosti Rz materiálu 12050.1 při obrábění 4-břítou frézou

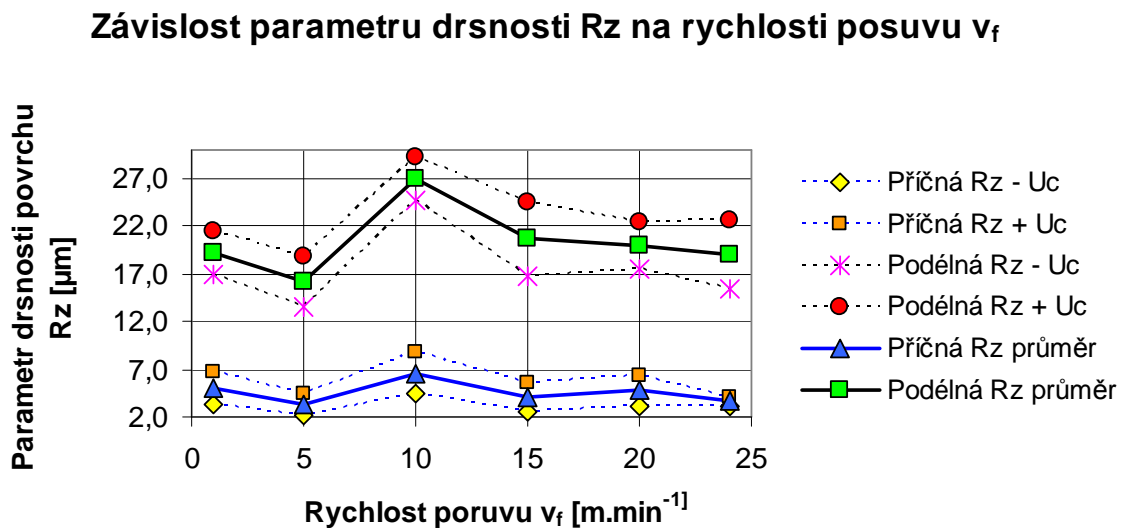
| Parametr drsnosti Rz |                        |             |        |              |        |
|----------------------|------------------------|-------------|--------|--------------|--------|
| pl.<br>č.            | vf                     | příčný směr |        | podélný směr |        |
|                      |                        | Rz          |        | Rz           |        |
| -                    | [m.min <sup>-1</sup> ] | [μm]        |        | [μm]         |        |
| 1                    | 1                      | 5,04        | ± 1,72 | 19,28        | ± 2,25 |
| 2                    | 5                      | 3,28        | ± 1,16 | 16,18        | ± 2,71 |
| 3                    | 10                     | 6,62        | ± 2,15 | 27,06        | ± 2,28 |
| 4                    | 15                     | 4,06        | ± 1,53 | 20,66        | ± 3,87 |
| 5                    | 20                     | 4,76        | ± 1,58 | 19,90        | ± 2,46 |
| 6                    | 24                     | 3,66        | ± 0,45 | 18,98        | ± 3,56 |



Obr. 19 Graf dosažené drsnosti povrchu pro materiál 12050.1 při obrábění 4-břítou frézou



Obr. 20 Graf závislosti drsnosti  $R_a$  na rychlosti posuvu pro materiál 12050.1 při obrábění 4-břítou frézou



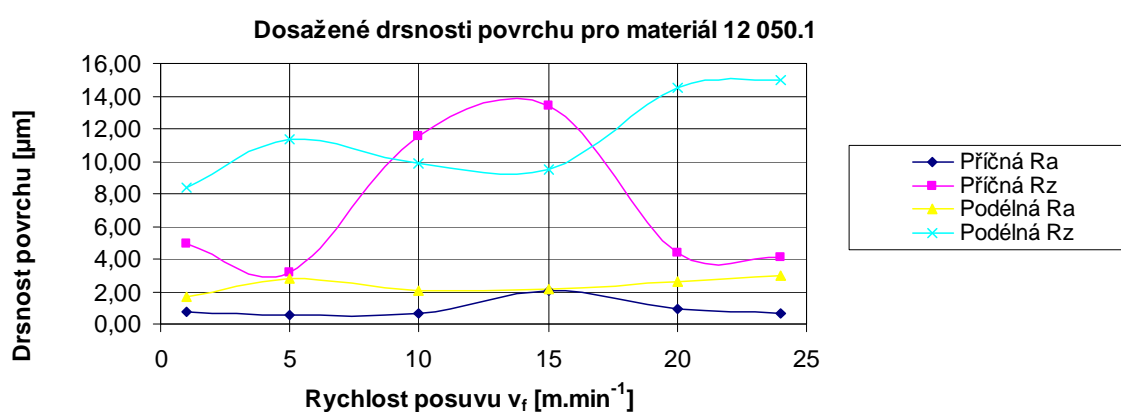
Obr. 21 Graf závislosti drsnosti  $R_z$  na rychlosti posuvu pro materiál 12050.1 při obrábění 4-břítou frézou

Tab. 15 Hodnoty parametru drsnosti Ra materiálu 12050.1 při obrábění 3-břitou frézou

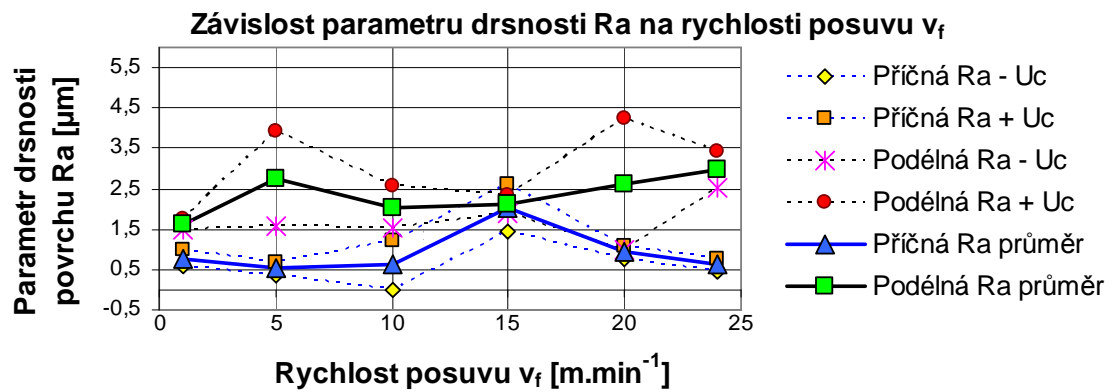
| Parametr drsnosti Ra |                        |             |   |      |              |        |
|----------------------|------------------------|-------------|---|------|--------------|--------|
| pl.<br>č.            | vf                     | příčný směr |   |      | podélný směr |        |
|                      |                        | Ra          |   |      | Ra           |        |
| -                    | [m.min <sup>-1</sup> ] | [μm]        |   |      | [μm]         |        |
| 7                    | 1                      | 0,78        | ± | 0,20 | 1,63         | ± 0,12 |
| 8                    | 5                      | 0,53        | ± | 0,15 | 2,75         | ± 1,16 |
| 9                    | 10                     | 0,61        | ± | 0,62 | 2,04         | ± 0,52 |
| 10                   | 15                     | 2,03        | ± | 0,60 | 2,11         | ± 0,21 |
| 11                   | 20                     | 0,92        | ± | 0,14 | 2,60         | ± 1,63 |
| 12                   | 24                     | 0,61        | ± | 0,15 | 2,98         | ± 0,47 |

Tab. 16 Hodnoty parametru drsnosti Rz materiálu 12050.1 při obrábění 3-břitou frézou

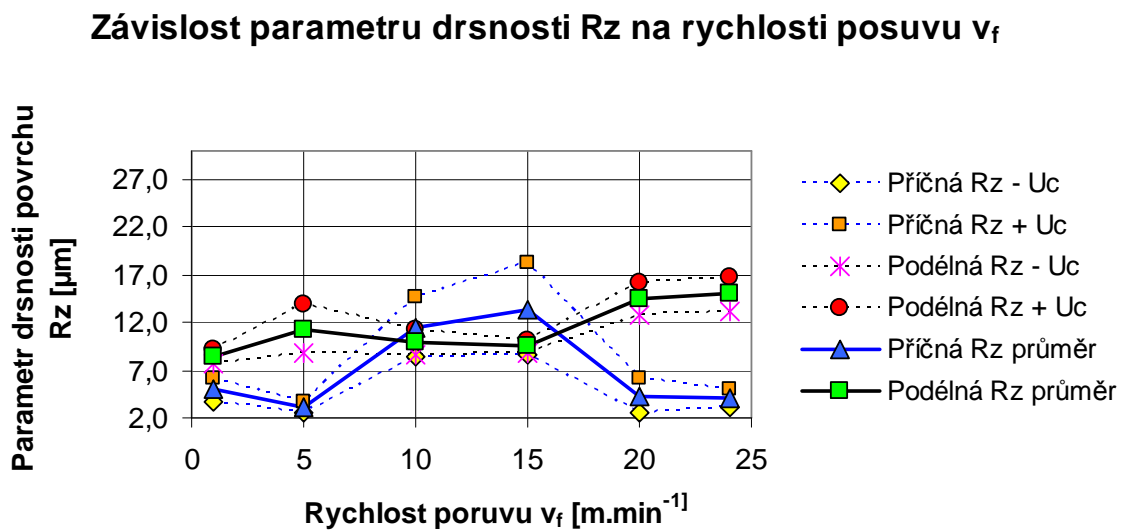
| Parametr drsnosti Rz |                        |             |   |      |              |        |
|----------------------|------------------------|-------------|---|------|--------------|--------|
| pl.<br>č.            | vf                     | příčný směr |   |      | podélný směr |        |
|                      |                        | Rz          |   |      | Rz           |        |
| -                    | [m.min <sup>-1</sup> ] | [μm]        |   |      | [μm]         |        |
| 7                    | 1                      | 4,94        | ± | 1,19 | 8,40         | ± 0,71 |
| 8                    | 5                      | 3,14        | ± | 0,65 | 11,34        | ± 2,56 |
| 9                    | 10                     | 11,50       | ± | 3,15 | 9,90         | ± 1,30 |
| 10                   | 15                     | 13,42       | ± | 4,83 | 9,48         | ± 0,72 |
| 11                   | 20                     | 4,34        | ± | 1,83 | 14,48        | ± 1,63 |
| 12                   | 24                     | 4,06        | ± | 0,99 | 15,00        | ± 1,81 |



Obr. 22 Graf dosažené drsnosti povrchu pro materiál 12050.1 při obrábění 3-břitou frézou



Obr. 23 Graf závislosti drsnosti Ra na rychlosti posuvu pro materiál 12050.1 při obrábění 3-břítou frézou



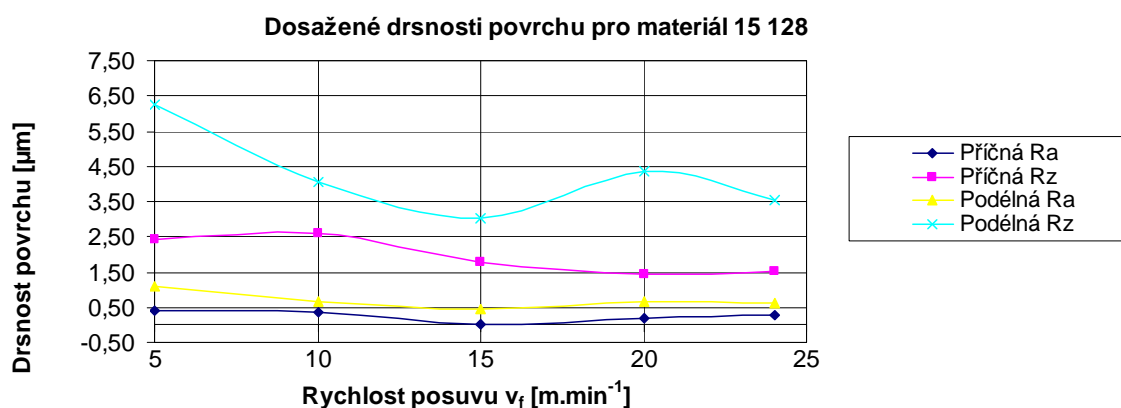
Obr. 24 Graf závislosti drsnosti Rz na rychlosti posuvu pro materiál 12050.1 při obrábění 4-břítou frézou

Tab. 17 Hodnoty parametru drsnosti Ra materiálu 15128 při obrábění 4-břítou frézou

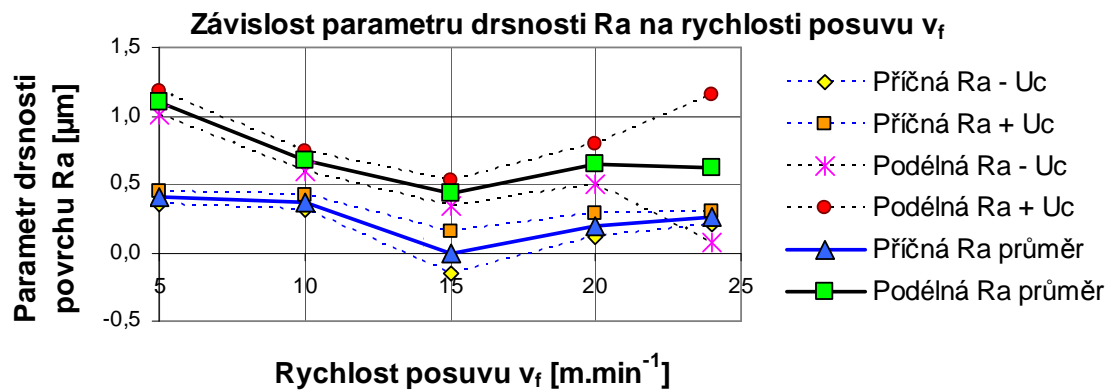
| Parametr drsnosti Ra |         |             |   |      |              |        |
|----------------------|---------|-------------|---|------|--------------|--------|
| pl. č.               | vf      | příčný směr |   |      | podélný směr |        |
|                      |         | Ra          |   |      | Ra           |        |
| -                    | [m/min] | [μm]        |   |      | [μm]         |        |
| 23                   | 5       | 0,40        | ± | 0,05 | 1,09         | ± 0,09 |
| 24                   | 10      | 0,37        | ± | 0,05 | 0,67         | ± 0,08 |
| 25                   | 15      | 0,00        | ± | 0,15 | 0,43         | ± 0,09 |
| 26                   | 20      | 0,20        | ± | 0,09 | 0,65         | ± 0,14 |
| 27                   | 24      | 0,26        | ± | 0,05 | 0,62         | ± 0,54 |

Tab. 18 Hodnoty parametru drsnosti Rz materiálu 15128 při obrábění 4-břítou frézou

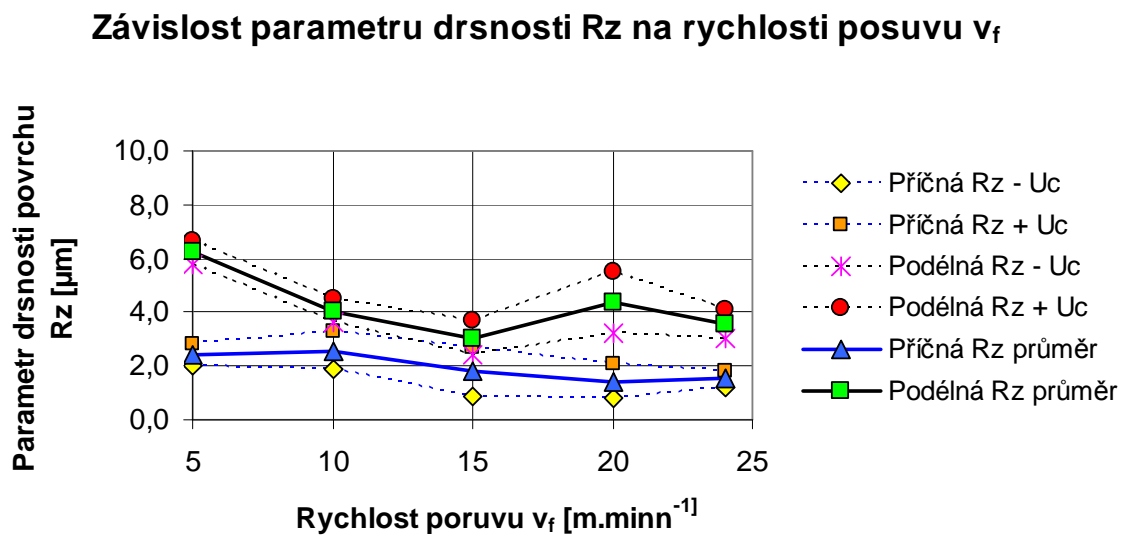
| Parametr drsnosti Rz |         |             |   |      |              |        |
|----------------------|---------|-------------|---|------|--------------|--------|
| vz. č.               | vf      | příčný směr |   |      | podélný směr |        |
|                      |         | Rz          |   |      | Rz           |        |
| -                    | [m/min] | [μm]        |   |      | [μm]         |        |
| 23                   | 5       | 2,42        | ± | 0,43 | 6,24         | ± 0,44 |
| 24                   | 10      | 2,58        | ± | 0,72 | 4,06         | ± 0,44 |
| 25                   | 15      | 1,78        | ± | 0,89 | 3,04         | ± 0,64 |
| 26                   | 20      | 1,44        | ± | 0,64 | 4,36         | ± 1,13 |
| 27                   | 24      | 1,52        | ± | 0,32 | 3,56         | ± 0,54 |



Obr. 25 Graf dosažené drsnosti povrchu pro materiál 15128 při obrábění 4-břítou frézou



Obr. 26 Graf závislosti drsnosti Ra na rychlosti posuvu pro materiál 15128 při obrábění 4-břítou frézou



Obr. 27 Graf závislosti drsnosti Rz na rychlosti posuvu pro materiál 15128 při obrábění 4-břítou frézou

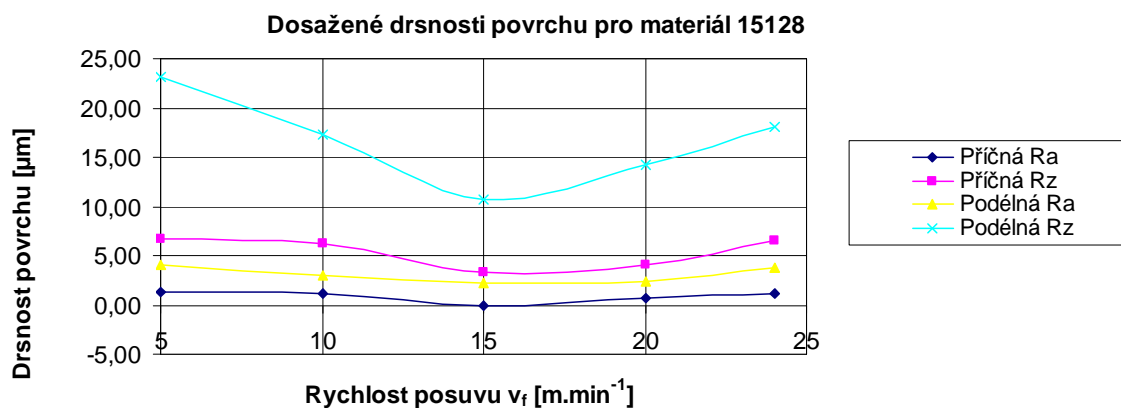


Tab. 19 Hodnoty parametru drsnosti Ra materiálu 15128 při obrábění 3-břitou frézou

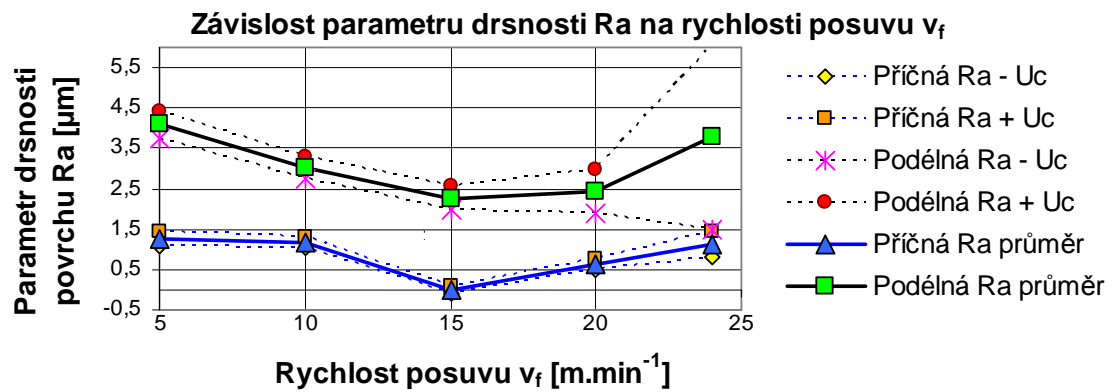
| Parametr drsnosti Ra |         |             |        |              |        |  |
|----------------------|---------|-------------|--------|--------------|--------|--|
| pl.<br>č.            | vf      | příčný směr |        | podélný směr |        |  |
|                      |         | Ra          |        | Ra           |        |  |
| -                    | [m/min] | [μm]        |        | [μm]         |        |  |
| 28                   | 5       | 1,26        | ± 0,16 | 4,10         | ± 0,34 |  |
| 29                   | 10      | 1,16        | ± 0,13 | 3,01         | ± 0,26 |  |
| 30                   | 15      | 0,00        | ± 0,08 | 2,27         | ± 0,28 |  |
| 31                   | 20      | 0,63        | ± 0,13 | 2,42         | ± 0,53 |  |
| 32                   | 24      | 1,12        | ± 0,30 | 3,77         | ± 2,26 |  |

Tab. 20 Hodnoty parametru drsnosti Rz materiálu 15128 při obrábění 3-břitou frézou

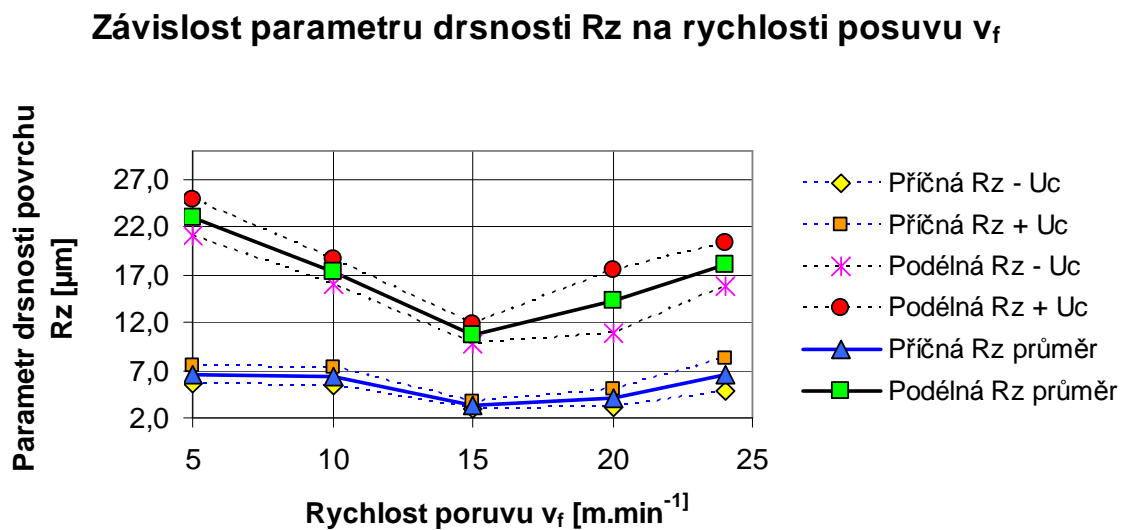
| Parametr drsnosti Rz |         |             |        |              |        |  |
|----------------------|---------|-------------|--------|--------------|--------|--|
| pl.<br>č.            | vf      | příčný směr |        | podélný směr |        |  |
|                      |         | Rz          |        | Rz           |        |  |
| -                    | [m/min] | [μm]        |        | [μm]         |        |  |
| 28                   | 5       | 6,62        | ± 0,96 | 23,08        | ± 1,88 |  |
| 29                   | 10      | 6,28        | ± 0,97 | 17,38        | ± 1,32 |  |
| 30                   | 15      | 3,28        | ± 0,38 | 10,72        | ± 1,05 |  |
| 31                   | 20      | 4,08        | ± 1,02 | 14,24        | ± 3,35 |  |
| 32                   | 24      | 6,54        | ± 1,73 | 18,04        | ± 2,26 |  |



Obr. 28 Graf dosažené drsnosti povrchu pro materiál 15128 při obrábění 3-břitou frézou



Obr. 29 Graf závislosti drsnosti Ra na rychlosti posuvu pro materiál 15128 při obrábění 3-břítou frézou



Obr. 30 Graf závislosti drsnosti Rz na rychlosti posuvu pro materiál 15128 při obrábění 3-břítou frézou

#### 4.5 Stanovení tvrdosti povrchu

Tvrdost, jako jedna z mechanických vlastností, má hlavně u kovových materiálů mimořádnou důležitost. Ze všech vlastností materiálu ji můžeme zjistit nejrychleji,

nejlevněji a i na předmětech nejmenších rozměrů. Z tvrdosti často usuzujeme i na některé další vlastnosti materiálu (pevnost v tahu, obrobiteľnosť apod.). Zkouší se buď na zkušebních vzorcích, nebo přímo na hotových výrobcích.

Tvrдость definujeme jako odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa. Na této definici je založena většina přístrojů k měření tvrdosti. Hodnoty tvrdosti se uvádějí buď bez jednotek, nebo, jsou-li odvozeny ze vztahu mezi tlakovou silou a plochou vtisku, přisuzujeme jim jednotku  $\text{N/mm}^2$ . Protože však tento způsob může vést k omylům (k záměně za pevnost), je lépe uvádět tvrdost jako číslo nepojmenované, pouze s udáním způsobu měření nebo stupnice. Pro tvrdost používáme značku H. Zkoušky tvrdosti rozdělujeme na zkoušky vrypové, vnikací a odrazové.

Tvrдость podle Brinella (ČSN 42 0371) zjišťujeme vtlačováním ocelové kalené kuličky o průměru  $D=10; 5; 2.5; 2$  a  $1$  mm rovnoměrně stupňovanou silou  $F$  ( $F=300 D^2; 100 D^2; 50 D^2$  a  $25 D^2$  N) po dobu  $t$  ( $t=10; 30; 120; 180$  s) do lesklé rovné plochy zkušebního vzorku nebo zkoušené součásti. Zkouší se na Brinellově tvrdoměru. Kulička vytvoří na zkušebním vzorku kulovitý vtisk. Tvrдость určujeme podle průměru vtisku, který měříme dvakrát (kolmo na sebe), abychom vyloučili chyby vzniklé nepřesností vtisku. Pro praktickou potřebu jsou sestaveny tabulky, ve kterých podle průměru vtisku  $d$  a velikosti použité síly  $F$  najdeme přímo odpovídající tvrdost a pevnost. Označení tvrdosti se skládá ze značky tvrdosti HB a k ní připojených údajů podmínek zkoušky, tj. průměru kuličky  $D$ , síly  $F$  a doby zatížení  $t$ . Tyto údaje jsou od sebe odděleny šikmou zlomkovou čarou (např. HB 5/7500/30 = 320). Pro nejběžnější podmínky, tj. HB 10/30000/10, používáme jen označení HB (např. HB=210).

Přesnost měření závisí na správném proměření vtisku. U Brinellovy zkoušky je toto proměření obtížné a nepřesné, což je její nevýhodou. Vtisk bývá někdy nezřetelný a nesouměrný. Na průměr vtisku má velký vliv i vtažení materiálu po kraji vtisku (u materiálu nezpevněného) nebo naopak vytlačení obvodového valu (u materiálu zpevněného). Příčinou další chyby je deformace použité vtlačované kuličky (je z kalené oceli). Pro materiály tvrdší než HB=400 není již ocelová kulička vhodná a používá se kuličky ze slinutých karbidů. Není vhodná pro kalené předměty.

Zkouška podle Brinella je důležitá hlavně proto, že mezi tvrdostí HB a pevností v tahu  $\sigma_{pt}$  platí u kovových materiálů empiricky zjištěná přímá závislost daná vztahem:

$$\sigma_{pt}(0,31 \text{ až } 0,41)HB.$$

Brinellovy tvrdoměry mají různou velikost a provedení. Ve velkých továrnách a laboratořích, kde se zkoušky tvrdostí konají po celý pracovní den, mají velké stabilní přístroje. Pro malé dílny, sklady, montáže nebo pro zkušební účely na stavbách byly zkonstruovány malé jednoduché přístroje. [17]

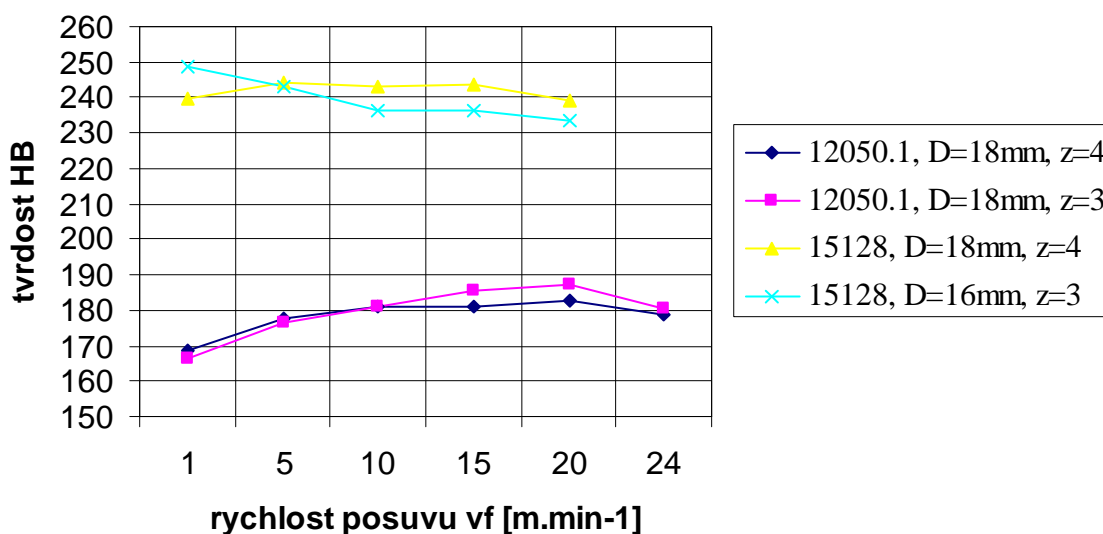
U našeho experimentu byla použita kulička o průměru 2,5 mm a síla 187,5 N.

#### 4.5.1 Tabulky a graf naměřených hodnot

Tab. 21 Výsledky zkoušek tvrdosti pro ocel 12050.1 a ocel 15128

| Ocel 12050.1 | HBW 2,5/187,5 |     | Ocel 15128 | HBW 2,5/187,5 |     |
|--------------|---------------|-----|------------|---------------|-----|
| Plocha       | 1             | 2   | Plocha     | 1             | 2   |
| 1            | 170           | 167 | 23         | 239           | 240 |
| 2            | 175           | 180 | 24         | 243           | 245 |
| 3            | 183           | 179 | 25         | 242           | 244 |
| 4            | 182           | 180 | 26         | 239           | 248 |
| 5            | 182           | 184 | 27         | 238           | 240 |
| 6            | 182           | 175 | 28         | 248           | 249 |
| 7            | 168           | 165 | 29         | 243           | 243 |
| 8            | 182           | 171 | 30         | 238           | 235 |
| 9            | 182           | 180 | 31         | 236           | 237 |
| 10           | 185           | 186 | 32         | 231           | 236 |
| 11           | 191           | 183 |            |               |     |
| 12           | 182           | 179 |            |               |     |

#### Výsledky zkoušek tvrdosti HB 2,5/187,5



Obr. 31 Graf výsledků zkoušek tvrdosti HB 2,5/187,5

## **4.6 Stanovení zbytkových pnutí**

Zbytková napětí jsou napětí, která zůstávají v povrchu součásti i po odstranění příčin, která je vyvolala. Při obrábění dochází ke vzniku zbytkových napětí v důsledku tepelného zpracování a obrábění. Tento problém je obzvláště významný u moderních technologií jako vysokorychlostní tvrdé frézování (HSC), kdy dochází k extrémním záběrovým podmínkám jak z mechanického, tak i z tepelného hlediska. Vznik zbytkových napětí v závislosti na řezné rychlosti, posuvu, typu nástroje a dalších parametrech je proto jednou z důležitých součástí optimalizace procesu HSC obrábění. Pro hodnocení zbytkových pnutí po vysokorychlostním frézování byla využita magnetoelastická metoda založená na Barkhausenova šumu.

### **4.6.1 Charakteristika posuzovaného materiálu 12050.1**

Pro ověřování vlastností povrchových vrstev materiálu byl posuzován vzorek materiálu 12 050.1 s 12ti průjezdy vysokorychlostního frézování s tří a čtyř-břitou frézou. S ohledem na předpoklad ovlivnění povrchových a podpovrchových vrstev materiálu procesem obrábění bylo provedeno úvodní měření magnetickoelastickou metodou.

### **4.6.2 Charakteristika magnetoelastické metody**

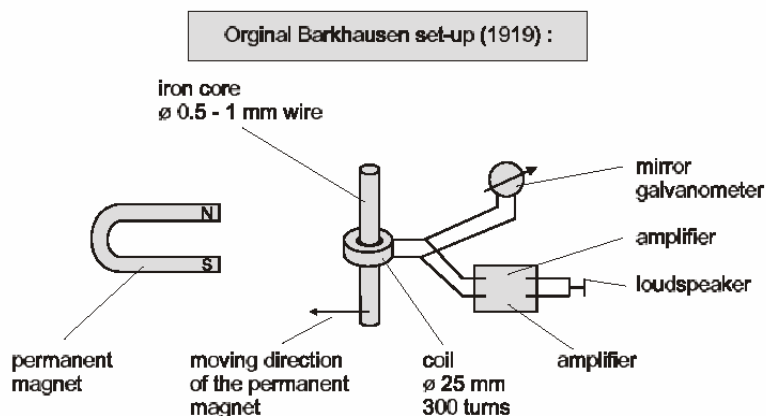
Metoda pracuje s využitím Barkhausenova magnetického šumu. Zjednodušeně se dá tato metoda popsat jako odezva materiálu na působení magnetického pole. Při působení magnetického pole na materiál dochází ke změně orientace Weissových domén. Ke změně orientace nedochází spojitě, ale po určitých skocích, které se v cívce, obklopující magnetový kov, projevují jako proudové nárazy. Ty lze po zesílení akusticky pozorovat jako tzv. Barkhausenův šum. Přítomnost a rozložení napětí ovlivňují cestu, po které se domény ubírají směrem ke snadné orientaci ve směru magnetizace. V důsledku toho u materiálů, jako jsou železo, většina ocelí, kobalt, tlakové napětí snižuje intenzitu Barkhausenova šumu, zatímco tahové napětí ji zvyšuje. Magnetoelastická metoda je metodou nepřímou. Pro kvantitativní hodnocení napětí je nutná kalibrace metody, kdy se Barkhausenův šum převádí na hodnotu napětí podle příslušné kalibrační křivky.

Při běžných aplikacích se hloubka měření pohybuje v rozmezí od 0,01 mm do 1,5 mm a snímaná plocha je několik mm<sup>2</sup>. Také v tomto případě lze z měření určit směr hlavních složek napětí. Významnou vlastností metody je její nedestruktivní charakter a rychlá odezva. Tyto vlastnosti umožňují měřit v řádově větším počtu sledovaných míst. Měření dává úspěšné výsledky především v podmínkách, kdy se nemění strukturní charakteristiky příslušného feromagnetického materiálu (např. oceli) v proměřovaných místech. Praktické použití magnetoelastické metody Barkhausenova šumu je možné v oblastech:

- měření zbytkových napětí za předpokladu, že mikrostrukturní parametry se pohybují v rozumných mezích,
- měření strukturních změn, za předpokladu, že úroveň napětí se pohybuje v rozumných mezích
- zkoušení vad, které mohou vyvolávat změny v napětí v mikrostruktuře.

#### 4.6.3 Princip Barkhausenova šumu

Barkhausenův šum je jev poprvé popsán v roce 1919. Uspořádání použité profesorem Barkhausenem je znázorněno na obrázku č. 32. [21]



Obr. 32 Původní Barkhausenovo uspořádání [21]

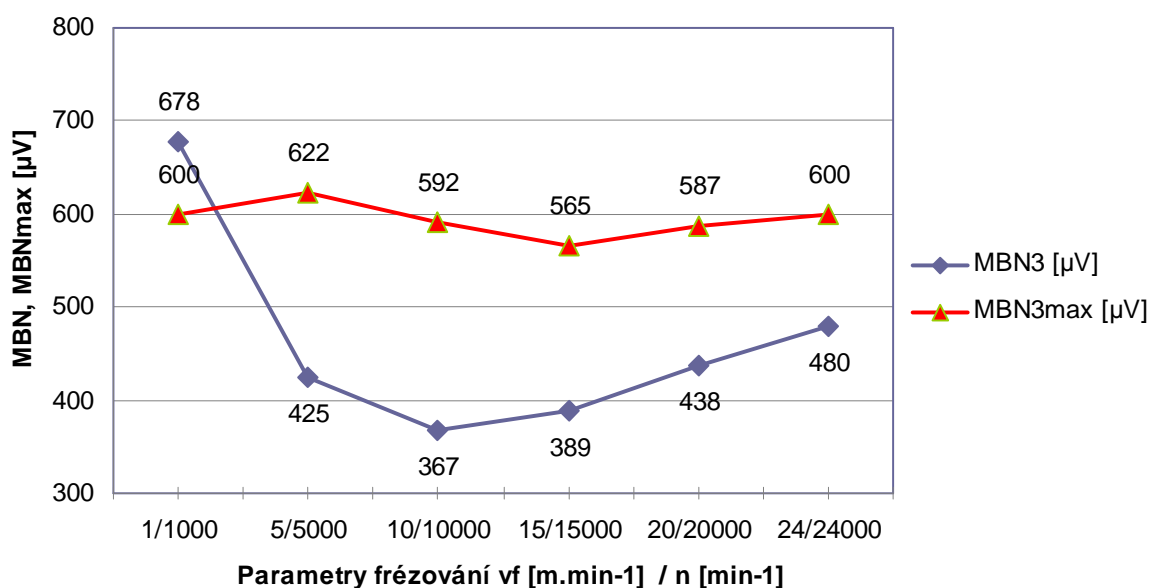
Přiblížíme či vzdálíme-li magnet od jádra, je v reproduktoru slyšitelné chrastění či práskání. Tento šum souvisí s nespojitostmi v procesu magnetizace feromagnetika. Feromagnetické materiály si lze představit jako složené z malých magnetických oblastí podobným tyčovým magnetům, které se nazývají domény. Každá doména se magnetizuje

podél krystalograficky význačných směrů. Domény jsou přitom odděleny navzájem hranicemi (tzv. stěny). Vnější magnetické pole způsobuje pohyb doménových stěn. Pohyb stěn se projeví v celkové magnetizaci vzorku. Je-li cívka z vodivého drátu umístěna v blízkosti vzorku v době, kdy se doménová stěna pohybuje, související změna magnetizace vzorku indukuje v cívkce elektrický puls. [21]

#### 4.6.4 Tabulky a grafy naměřených hodnot

Tab. 22 Maximální amplitudy MBN<sub>max</sub> a MBN pro frézu s třemi zuby

| $v_f$ [m.min <sup>-1</sup> ] / $n$ [min <sup>-1</sup> ] | MBN <sub>3</sub> [μV] | MBN <sub>3max</sub> [μV] |
|---|-----------------------|--------------------------|
| <b>1/1000</b>   | 678                   | 600                      |
| <b>5/5000</b>   | 425                   | 622                      |
| <b>10/10000</b>   | 367                   | 592                      |
| <b>15/15000</b>   | 389                   | 565                      |
| <b>20/20000</b>   | 438                   | 587                      |
| <b>24/24000</b>   | 480                   | 600                      |

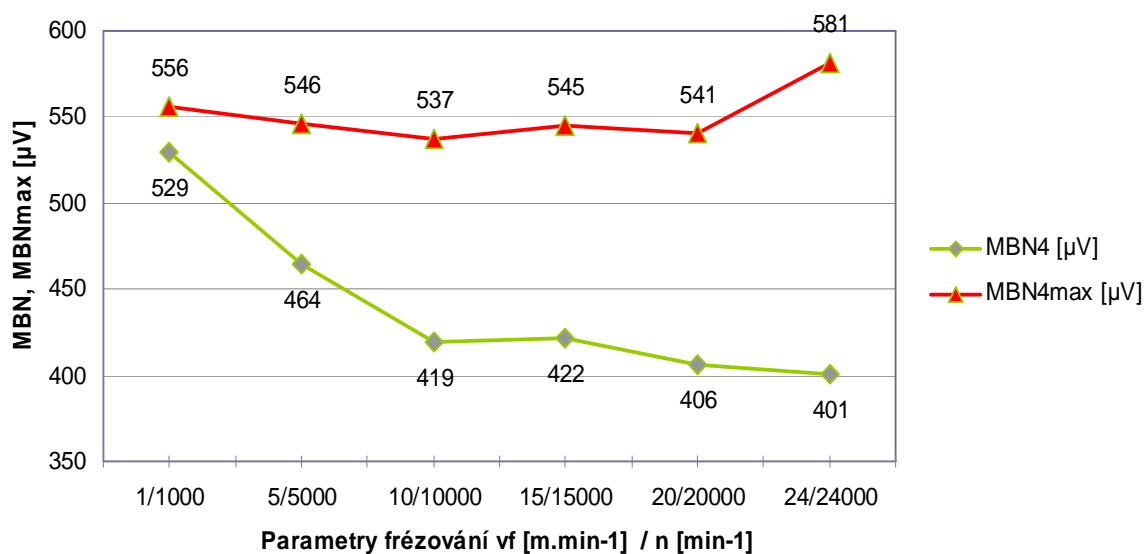


Obr. 33 Průběh maximální amplitudy MBN<sub>max</sub> a MBN pro frézu s třemi zuby

Na obr. 33 je provedeno vyhodnocení MBN a MBN<sub>max</sub> pro frézu s třemi zuby. Z grafu je patrné negativní působení nízkých parametrů frézování na povrchové zbytkové napětí. Optimum je zcela zřetelné při parametrech deset [m.min<sup>-1</sup>] / deset tisíc [min<sup>-1</sup>] dále jsou hodnoty již méně příznivé. Hodnota MBN<sub>max</sub> je ustálená, což svědčí o ustálených podmínkách frézování bez podstatných strukturních změn.

Tab. 23 Maximální amplitudy MBN<sub>max</sub> a MBN pro frézu s čtyřmi zuby)

| <b>v<sub>f</sub> [m.min<sup>-1</sup>] / n [min<sup>-1</sup>]</b> | <b>MBN<sub>4</sub> [μV]</b> | <b>MBN<sub>4max</sub> [μV]</b> |
|--|-----------------------------|--------------------------------|
| <b>1/1000</b>  | 529                         | 556                            |
| <b>5/5000</b>  | 464                         | 546                            |
| <b>10/10000</b>  | 419                         | 537                            |
| <b>15/15000</b>  | 422                         | 545                            |
| <b>20/20000</b>  | 406                         | 541                            |
| <b>24/24000</b>  | 401                         | 581                            |

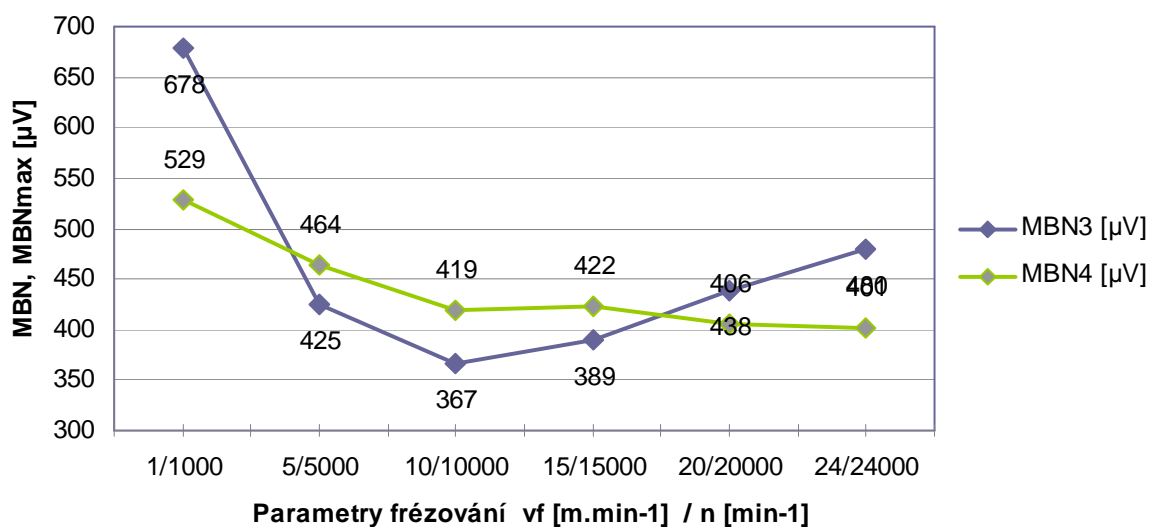
Obr. 34 Průběh maximální amplitudy MBN<sub>max</sub> a MBN pro frézu se čtyřmi zuby

Na obr. 34 je provedeno vyhodnocení MBN a MBN<sub>max</sub> pro frézu se čtyřmi zuby. S nárůstem parametrů frézování úroveň napětí klesá, což výrazně preferuje max. parametry. Nebylo zjištěno výrazné minimum funkční závislosti v rozsahu použitých parametrů frézování.



Tab. 24 Porovnání MBN pro frézy se třemi čtyřmi zuby

| <b>vf [m.min-1] / n [min-1]</b> | <b>MBN<sub>3</sub> [μV]</b> | <b>MBN<sub>4</sub> [μV]</b> |
|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| <b>1/1000</b>                   | 678                         | 529                         |
| <b>5/5000</b>                   | 425                         | 464                         |
| <b>10/10000</b>                 | 367                         | 419                         |
| <b>15/15000</b>                 | 389                         | 422                         |
| <b>20/20000</b>                 | 438                         | 406                         |
| <b>24/24000</b>                 | 480                         | 401                         |



Obr. 35 Porovnání MBN pro frézy se třemi čtyřmi zuby

Na obr.35 je provedeno porovnání výsledků MBN frézy se třemi a čtyřmi zuby, což umožňuje pro daný rozsah parametrů frézování zvolit vhodný nástroj. Zřetelně se jeví, že pro max. parametry bude optimálnější použití nástrojů s více zuby.

## 5. Vyhodnocení a shrnutí přínosů pro praxi

### 5.1 Vyhodnocení dosažených výsledků u drsnosti povrchu

U experimentu, který měl potvrdit vliv vysokorychlostního obrábění na drsnost (kvalitu) obrobené plochy bylo měření prováděno v příčném a podélném směru a to pro hodnotu drsnosti  $R_a$  i  $R_z$ . Podélným směrem rozumíme takový směr rovnoběžný se směrem posuvu frézy, příčným směrem pak směr kolmý na posuv nástroje. Každé měření jak v příčném tak i podélném směru se provádělo pět-krát a byl proveden test na zatížení výsledku hrubou chybou měření. Z těchto hodnot se nejprve určila průměrná hodnota a směrodatná odchylka  $s_{(x)}$ . Dále byly počítány standardní nejistoty typu A a B. Nakonec byla počítána kombinovaná standardní nejistota typu C, která byla zaokrouhlena na dvě desetinná místa.

Předpokladem vlivu vysokorychlostního obrábění na drsnost povrchu bylo, že od posunové rychlosti  $15 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , se bude hodnota drsnosti povrchu snižovat a tím bude lepší jakost obrobené plochy. Tento předpoklad se potvrdil u materiálu oceli 12050.1 a částečně i u materiálu 15128. Ne všechny hodnoty však potvrdily předpoklad a to mohlo být způsobeno tím že měření bylo zatíženo chybou, dále mohlo být měření ovlivněno tuhostí soustavy stroj – nástroj – obrobek, nepřesností i tuhostí upínacího zařízení a dalšími, faktory které ovlivňují celý proces obrábění.

### 5.2 Vyhodnocení dosažených výsledků u tvrdosti povrchu

Při vyhodnocování tvrdosti povrchu u vysokorychlostního obrábění se měřila tvrdost HB 2,5 / 187,5 tzn. že kulička o průměru 2,5 mm se vtlačovala do materiálů silou 187,5 N. Měření bylo provedeno ve Vítkovicích testing center. Byly naměřeny dvě hodnoty vtisku. Z těchto hodnot sem vypočítal průměr. Následně sem tuto průměrnou hodnotu vynesl do grafu (obr.31) pro oba zkoušené materiály.

Předpoklad tohoto experimentu byl takový, že při překročení  $v_f = 15 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , se začnou projevovat efekty vysokorychlostního obrábění nebude tedy docházet ke zpevnění povrchové vrstvy, tím pádem se nebudou hodnoty tvrdosti HB zvyšovat. Tento předpoklad se potvrdil u materiálu 12050.1 a částečně i u materiálu 15128, kde byl od výše zmíněné

rychlost zaznamenaný mírný vzestup tvrdosti a následné mírný pokles této hodnoty.

### ***5.3 Vyhodnocení dosažených výsledků zbytkových pnutí v materiálu***

Měření zbytkových napětí magnetoelastickou metodou bylo provedeno v laboratoři Katedry mechanické technologie za pomoci Ing. Vladislava Ochodka. Výsledky měření potvrdily pozitivní vliv HSC na zbytková pnutí v povrchové vrstvě. Výrazným parametrem, který ovlivňuje úroveň Barkhausenova šumu je metalurgická struktura. Tento jev je možno popsat s použitím pojmu tvrdost. Intenzita signálu spojitě klesá s rostoucí tvrdostí. Měření Barkhausenova šumu tedy poskytuje informaci o mikrostrukturním stavu materiálu.

## 6. Závěr

V diplomové práci sem byl řešen vliv řezných parametrů na integritu povrchu při vysokorychlostním obrábění. Po úvodní části byly uvedeny teoretické aspekty konvenčního a vysokorychlostního obrábění. Zde jsem zařadil jak dochází k tvorbě třísky u obou způsobu obrábění a jak vzniká plastická deformace v místě řezu. Popsal sem také výhody aplikace HSC technologie, její teoretické aspekty a vlivy na obrábění. V další kapitole popisují pojem integrita povrchu a jak ji ovlivňují řezné parametry obrábění.

V experimentální části se věnuji nejprve popisu stroje, nástrojů, materiálů a dalších zařízení, které byly k provedení samotného experimentu zapotřebí. Dále uvádím parametry samotného frézování a podrobněji se věnuji vyhodnocovaným parametrům, které jsou: drsnost povrchu Ra, Rz, tvrdost HB a zbytková pnutí, která zůstávají v materiálu po frézování. Při frézování materiálů 12050.1 a 15128 bylo použito dvou fréz 3-břítých Ø18, Ø16 mm a jedné frézy 4- břité Ø 18mm. Drsnost povrchu byla vyhodnocen v programu SJ-Tools pro Surf test série SJ, byla vypočítána také nejistota s kterou bylo měření prováděno. K posouzení tvrdosti povrchu byla použita tvrdost dle Brinella a to 2,5/187,5. Zkoušky tvrdostí byl proveden ve Vítkovice testing center s. r. o. Vyhodnocení zbytkových napětí v materiálu bylo provedeno magnetoelastickou metodou v laboratoři Katedry mechanické technologie Fakulty strojní VŠB- TUO.

Výsledky dosazené ve všech třech částech experimentu buď úplně nebo částečně potvrdily předpokládaný pozitivní vliv HSC technologie frézování na integritu obrobené plochy. Obecně si dovoluji tvrdit, že se postupně přechází na vysokorychlostní obrábění, tento trend bude pokračovat díky pozitivním vlivům na obrobenou plochu, ekonomickým a dalším důvodům, které vysokorychlostní obrábění beze sporu má.

## 7. Použitá literatura

[1] Čep, R.; Brychta, J.; Sadílek, M.; Petřkovská, L.; Nováková, J. Nové směry v progresivním obrábění [online]. Ostrava : VŠB-TUO, FS, poslední aktualizace 3.7.2006 [cit. 2008/10/09]. Dostupný z www: <<http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/>>..s.251

[2] Skopeček, T.; Vodička, J. Základy vysokorychlostního obrábění – HSC. Plzeň: Vydavatelství Západočeské univerzity v Plzni, 2005, s. 134. ISBN 80-7043-3444-2

[3] ZELENÝ, J. Vysokorychlostní obrábění. MM průmyslové spektrum. 2000. ISSN 1212-2572.

[4] MM spektrum [online] Praha: MM publishing, s.r.o [cit. 15.3.2009] Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/tvorba-trisky-pri-vysokorychlostnim-obrabeni>>.

[5] MM spektrum [online] Praha: MM publishing, s.r.o [cit. 15.3.2009] Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/dulezite-aspekty-vysokorychlostniho-obrabeni>>.

[6] HUMÁR, Anton. Technologie 1. Technologie obrábění -1.část. Brno: VUT- Brno, FSI, 2003. 138 s.

[7] BILÍK, Oldřich. Obrábění 2 – 1. díl. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 1994. 131 s. il. ISBN 80-7078-228-5

[8] Technotools OHG, Haferwende, Germany. DMU 60 monoBLOCK® [online]. [cit. 2009-01-15]. Dostupný z WWW:<  
[http://www.technotools.de/assets/images/DMU\\_60\\_monoBlock.gif](http://www.technotools.de/assets/images/DMU_60_monoBlock.gif)>.

[9] Gildemeister Aktiengesellschaft, Bielefeld, Germany. DMU 60 monoBLOCK®/ Highly dynamic, for the shortest cycle times at the highest quality [online]. [cit. 2009-01-15]. Dostupný z WWW:<

<http://www.dmgczech.com/en,milling,dmu60monoBLOCKnd?opendocument>>.

[10] Renishaw s. r. o., Brno, Česká republika. OMP60 obrobková sonda s optickým systémem OMI-2 [online]. 2005 [cit. 2009-01-15]. s. 2. Dostupný z WWW:<  
<http://www.renishaw.com/media/pdf/cs/043f985cd4e14c31852c95f7a044b056.pdf>>.

[11] Renishaw s. r. o., Brno, Česká republika. The OMI optical machine interface [online]. 2005 [cit. 2009-01-15]. Dostupný z WWW:<  
<http://www.renishaw.com/media/img/gen/c0662d94f7464c83b9d0764fcddbaa21.jpg>>.

[12] FSI VUT v Brně, Technická, Brno. Ocel 12 050.3 [online]. 2008 [cit. 2009-01-15]. Dostupný z WWW:<  
[http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/databaze\\_modelu\\_soubory/ocel\\_12050.3.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/databaze_modelu_soubory/ocel_12050.3.pdf)>.

[13] Bohdan Bolzano Steel a. s., Kladno, Česká republika. Rychlořezná ocel, výrobek práškové metalurgie ASP 2023 [online]. 2008 [cit. 2009-01-15]. Dostupný z WWW:<  
<http://www.bolzano.cz/download.php?FNAME=1221040652.upl&ANAME=ASP+2023.pdf>>.

[14] Mitutoyo Česko s.r.o., Teplice, Česká republika. Drsnoměry měření jakosti povrchu [online]. [cit. 2009-01-15]. Dostupný z WWW:< [http://www.mitutoyo-czech.cz/cz/pdf/06\\_drsnomery.pdf](http://www.mitutoyo-czech.cz/cz/pdf/06_drsnomery.pdf)>.

[15] Kennametal Europe GmbH, Neuhausen am Rheinfall, Švýcarsko. Milling Tool Catalog 6050 – metric [online]. 2006 [cit. 2009-01-15]. s. 580. Dostupný z WWW:<  
[https://www.kennametal.com/images/repositories/PDFs/milling\\_metric\\_finalr.pdf](https://www.kennametal.com/images/repositories/PDFs/milling_metric_finalr.pdf) >.

[16] MM spektrum [online] Praha: MM publishing, s.r.o [cit. 15.3.2009] Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/ekologicke-a-technologicke-aspekty-hsc-obrabení>>.

[17] Nauka o materiálu, Základní vlastnosti materiálu a jejich zkoušení. [cit. 20.4.2009]. Dostupný z WWW: <[http://mujweb.atlas.cz/www/pk80/pub/st/data/st1/zk3\\_3.htm](http://mujweb.atlas.cz/www/pk80/pub/st/data/st1/zk3_3.htm)>.

[18] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ (online). 2007. Dostupné z: <[http://www.umz.fme.vutbr.cz/Metodiky\\_%20mereni%5Cstruktura%20povrchu.htm](http://www.umz.fme.vutbr.cz/Metodiky_%20mereni%5Cstruktura%20povrchu.htm)>

[19] Zvyšování kvality hodnocení struktury povrchu. MM Průmyslové spektrum, 2004, č. 11, s. 68, ISSN 1212 – 2572

[20] Tichá, Š. Strojírenská metrologie. Část 1 - Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2004 - 104 s. : il. ISBN 80-248-0672-X80-248-0671

[21] MALEC, J. Některé nepříliš známé pojmy. *Strojírenská technologie*, 2006, roč. XI, č. 3, s. 4-5. ISSN 1211-4162.

[22] BRYCHTA, J. *Možnosti zvyšování efektivity obrábění prostorových ploch nepravidelných tvarů frézováním : teze habilitační práce*. Ostrava : Fakulta strojní, VŠB – TUO. 2001. s. 50.

[23] ERDEL, Bert P. *High – speed machining*. Dearborn, Michigan : Society of Manufacturing Engineering, 2003. s. 250. ISBN 0–87263–649–6.